



**Diana Raquel Jesus  
Capela**

**Estudo de coletores solares térmicos poliméricos**



**Diana Raquel Jesus  
Capela**

**Estudo de coletores solares térmicos poliméricos**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Física, realizada sob a orientação científica do Doutor Manuel Pedro Fernandes Graça, Investigador Principal do Departamento de Física da Universidade de Aveiro

Dedico este trabalho aos meus pais.

## **o júri**

presidente

Doutor Manuel Pedro Fernandes Graça  
Investigador Principal do Departamento de Física da Universidade de Aveiro

Doutor António Ferreira da Cunha  
Professor Auxiliar do Departamento de Física da Universidade de Aveiro

Doutora Maria João Petrolino de Carvalho  
Investigadora Principal do Laboratório Nacional de Energia e Geologia

## **agradecimentos**

Em primeiro lugar, quero agradecer ao meu orientador pela disponibilidade, apoio e todos os conhecimentos que me transmitiu. Também quero agradecer por me deixar sempre à vontade para expor as minhas ideias e discussão das mesmas mesmo quando não eram as mais corretas.

Às empresas Prirev, J.Prior e Openplus pela disponibilização do espaço e de todos os materiais e equipamentos necessários.

Ao Eng. Jorge Vaz pela revisão do documento.

Ao Diogo Batista pela ajuda na aprendizagem de Solidworks e na realização de toda a componente prática.

Ao Pedro Ângelo por toda a ajuda no desenvolvimento do software de monitorização e aquisição de dados.

Ao meu namorado agradeço pelo apoio incansável e carinho não só durante a realização da dissertação mas também ao longo do meu percurso académico. Obrigada por tornares os meus dias mais coloridos!

Ao meu irmão pelo apoio e interesse demonstrado durante os últimos meses.

O agradecimento mais importante é dirigido aos meus pais por todo o investimento monetário que fizeram para que eu e o meu irmão pudéssemos ter um curso superior.

**palavras-chave**

Energias renováveis, sol, aquecimento de água a baixo custo, sistemas solares térmicos poliméricos, termossifão.

**resumo**

O uso de coletores solares térmicos para a produção de águas quentes sanitárias é ainda baixo devido ao elevado custo associado aos sistemas tradicionais. A substituição de alguns dos materiais tradicionais como, por exemplo, o cobre e vidro por materiais poliméricos levará a reduções significativas nos custos de produção. Já existem painéis solares poliméricos no mercado porém, o seu uso é maioritariamente empregue no aquecimento de água de piscinas.

Os elevados custos e o uso ainda baixo deste tipo de sistemas para aquecimento de água impulsou a realização desta dissertação.

Na presente dissertação são propostos três protótipos, em diferentes configurações, de sistemas solares térmicos do tipo termossifão baseados em materiais poliméricos para a produção de águas quentes sanitárias. A novidade nos protótipos propostos, em relação aos já existentes no mercado, refere-se à utilização de um novo material polimérico como placa absorsora.

Será apresentado todo o processo de construção, montagem e todos os testes realizados por forma a caraterizar o seu desempenho.

**keywords**

Renewable energy, sun, water heating at low cost, polymeric solar thermal systems, thermosyphon.

**abstract**

The use of solar thermal collectors for production of domestic hot water is still low due to the high cost associated with traditional systems. The replacement of some of the traditional materials such as copper and glass by polymeric materials will lead to significant reductions in production costs. The polymeric solar panels are mostly used in pool water heating.

The high costs and the low use of this type of systems for heating water impelled the realization of this dissertation.

In the present dissertation three prototypes are proposed, in different configurations, of thermosyphon type solar thermal systems based on polymeric materials for the production of hot waters. The novelty in the proposed prototypes, compared to those already on the market, refers to the use of a new polymeric material as an absorber plate.

We will be presented the whole process of construction, assembly and all tests performed in order to characterize its performance.

# Índice

Lista de figuras  
Lista de tabelas  
Lista de símbolos  
Lista de acrónimos

<b>1. Introdução.....</b>	<b>1</b>
1.1 Enquadramento e motivação.....	1
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Energia solar.....	4
1.4 Sistemas solares térmicos.....	5
1.4.1 Sistemas solares térmicos para AQS.....	6
1.4.2 Fenómenos de congelamento e sobreaquecimento.....	10
1.4.3 Rendimento.....	10
1.4.4 Inclinação e perfis de consumo.....	12
<b>2. Apresentação e descrição do protótipos.....</b>	<b>14</b>
2.1 Protótipos desenvolvidos.....	14
2.2 Simulação 2D/3D e descrição dos materiais.....	14
2.2.1 Absorisor.....	13
2.2.2 Cobertura transparente.....	15
2.2.3 Tanque.....	15
2.2.4 Isolamento.....	16
2.2.5 Permutador.....	17
2.2.6 Suporte.....	17
2.2.7 Representação dos protótipos.....	18
<b>3. Construção, montagem e monitorização dos protótipos.....</b>	<b>20</b>
3.1 Descrição dos acessórios.....	20
3.2 Esquema de montagem dos acessórios.....	23
3.3 Construção, montagem e enchimento dos protótipos.....	24
3.3.1 Protótipo 1.....	24
3.3.2 Protótipo 2.....	27
3.3.3 Protótipo 3.....	28
3.4 Comportamento dos protótipos antes da monitorização.....	29
3.5 Controlo e monitorização.....	31
3.5.1 Sistema de aquisição de dados implementado.....	31
3.5.2 Problemas detetados.....	33
<b>4. Apresentação e análise de resultados experimentais.....</b>	<b>35</b>
4.1 Comportamento perante diferentes tipos de radiação.....	35
4.2 Perdas térmicas.....	39
4.3 Resposta ao consumo.....	41
4.4 Rendimento.....	44
<b>5. Conclusões e trabalho futuro.....</b>	<b>46</b>
<b>Bibliografia.....</b>	<b>48</b>



## Lista de figuras

Figura 1.1 - Evolução populacional e consumo de energia previsto até 2100 [5].....	1
Figura 1.2 - Consumo mundial de energia por setor [5].....	3
Figura 1.3 - Sistema solar térmico polimérico integrado na fachada de uma habitação, situada em Oslo [15].....	3
Figura 1.4 – Movimento da Terra em torno do Sol ao longo do ano com indicação dos solstícios em relação ao Hemisfério Norte. Adaptada de [17].....	4
Figura 1.5 - Espectro de emissão de radiação do corpo negro. Adaptada de [20].....	5
Figura 1.6 - Representação esquemática dos processos envolvidos entre radiação incidente e um corpo.....	5
Figura 1.7 - Eficiência de diferentes tipos de coletores em função do ganho de temperatura [24].....	6
Figura 1.8 - Representação esquemática do balanço energético num coletor plano [25].....	6
Figura 1.9: - Sistema solar térmico do tipo termossifão: a) Modo de circulação [31]; b) Aplicação no telhado de uma habitação [24].....	8
Figura 1.10 - Sistema solar térmico de armazenamento integrado [34].....	9
Figura 1.11 - Sistema solar térmico de circulação forçada [36].....	9
Figura 1.12 – Sistema solar térmico do tipo termossifão com permutador. Adaptada de [37].....	10
Figura 2.1 – Representação do absorsor.....	14
Figura 2.2 – Representação da cobertura transparente.....	15
Figura 2.3 – Representação do tanque de: a) e b) Protótipos 1 e 2; c) e d) Protótipo3.....	16
Figura 2.4 – Representação do isolamento.....	17
Figura 2.5 – Representação do permutador.....	17
Figura 2.6 – Representação dos protótipos.....	18
Figura 2.7 – Representação do protótipo 1 com indicação de circulação de água no circuito permutador - tanque.....	19
Figura 3.1 - a) Soprador de ar quente; b) Válvula misturadora; c) Caudalímetro; d) Eletroválvula; e) Sonda de temperatura; f) Bainhas; g) Caixa estanque; h) Piranómetro; i) Válvula passador manual; j) Válvula anti-retorno.....	20
Figura 3.2 – Diagrama esquemático.....	23
Figura 3.3 - a) Esquema de aproveitamento da placa PP; b) Tanque após corte.....	24
Figura 3.4 - Tanque após processo de dobragem a quente.....	25
Figura 3.5 - Ranhura do tanque onde é encaixado o absorsor.....	25
Figura 3.6 - Imagens do isolamento e suportes do protótipo.....	26
Figura 3.7 – a) Imagem de canto de conjunto tanque e absorsor; b) Parte inferior de absorsor.....	26
Figura 3.8 – a) Tubagens de água fria e quente no tanque; b) Sondas de temperatura unidas ao absorsor.....	27

Figura 3.9 – Imagens após colocação de casquilhos e oringues nas entradas de água fria e quente no tanque.....	27
Figura 3.10 - Suporte soldado dentro do tanque.....	28
Figura 3.11 - Protótipo 3; b) Topo.....	28
Figura 3.12 – Tubo de indicação nível de água.....	29
Figura 3.13 -Imagens do isolamento deteriorado.....	30
Figura 3.14 - Placa de lã de rocha.....	30
Figura 3.15 – Representação esquemática: a) Protótipos; b) Interior da caixa estanque; c) <i>Data logger</i> ; d) Computador.....	31
Figura 3.16 – Ambiente do software implementado.....	32
Figura 3.17 – Ambiente do softare implementado com indicação de gráficos.....	33
Figura 3.18 – Local de instalação do piranómetro.....	33
Figura 3.19 – a) Tanque rebentado do protótipo 2) ; b) Válvula redutora de pressão.....	34
Figura 4.1 – Gráfico da radiação incidente registada em quatro diferentes dias.....	35
Figura 4.2 Gráfico de temperaturas registadas no absorsor do protótipo 1 e absorsor do protótipo 2 para o dia de radiação 1.....	35
Figura 4.3 - Gráfico de temperaturas registadas no absorsor do protótipo 3 para o dia de radiação 1.....	36
Figura 4.4 -Gráfico de temperaturas registadas nos tanques para o dia de radiação 2: a) tanque dos protótipos 1 e 2; b) tanque e permutador do protótipo 3.....	36
Figura 4.5 – Gráfico de temperaturas registadas no dia de radiação 2 para os três protótipos no topo de: a) absorsor; b) tanque e permutador.....	37
Figura 4.6 Gráfico de temperaturas registadas nos absorsores para o dia de radiação 3: a) absorsor 1 e 2; b) absorsor 3.....	37
Figura 4.7 - Gráfico de temperaturas registadas no tanque dos protótipos 1 e 2 para o dia de radiação 3.....	38
Figura 4.8 - Gráfico de temperaturas registadas no tanque do protótipo 3 para o dia de radiação 3.....	38
Figura 4.9 – Gráfico de temperaturas registadas no dia de radiação 4 para os três protótipos no topo de: a) absorsor; b) tanque e permutador.....	38
Figura 4.10 - Perdas térmicas exibidas por protótipo 3, ao longo de vários, obtidas em situações diferentes.....	40
Figura 4.11 – Protótipo 3: a) adição de lã de rocha; b) adição de plástico de bolhas.....	40
Figura 4.12 – Comparação das perdas térmicas exibidas pelos protótipos ao longo de vários dias...	40
Figura 4.13 – Temperatura registada após consumo no protótipo 3 às 08:00h durante cinco minutos.....	41
Figura 4.14 – Temperatura registada após consumo no protótipo 3 às 08:00h durante 5 minutos e às 12:00h durante 7 minutos. (Legenda indicada na figura 4.13).....	42
Figura 4.15 – Temperatura registada após consumo no protótipo 3 às 18:00h durante 5 minutos. (Legenda indicada na figura 4.13).....	42

Figura 4.16 - Temperatura registada após consumo no protótipo 3 às 12:00 h durante 10 minutos e às 16:15 h durante 10 minutos. (Legenda indicada na figura 4.13).....	43
Figura 4.17 - Figura 4.17 – Temperatura registada durante consumo no protótipo 3 às 16:00 h. (Retirado de gráfico da figura 4.16).....	43
Figura 4.18 – Gráfico de temperaturas registadas no tanque de cada protótipo o longo do dia 6 mencionado na tabela 4.2 .....	43

## **Lista de tabelas**

Tabela 4.1 – Tempo de recuperação para diferentes testes de consumo.....	43
Tabela 4.2 – Rendimento do sistema obtido para alguns dias aleatórios.....	44

## Lista de símbolos

$\eta$	Rendimento	-
$Q_u$	Potência térmica útil	W
$A_c$	Área do coletor	m <sup>2</sup>
$I$	Potência da radiação incidente por unidade de área	W.m <sup>-2</sup>
$Q$	Energia útil	J
$\Delta t$	Intervalo de tempo	s
$m$	Massa de fluido	kg
$C_p$	Capacidade térmica mássica	J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
$\Delta T$	Variação de temperatura	K
$\eta_0$	Eficiência ótica	-
$a_1$	Coeficiente de perdas térmicas	W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup>
$a_2$	Dependência de temperatura do coeficiente de perdas térmicas	W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-2</sup>
$T_m$	Temperatura média	K
$T_a$	Temperatura ambiente	K
$T_{in}$	Temperatura de entrada	K
$T_m^*$	Diferença de temperatura reduzida	m <sup>2</sup> .K.W <sup>-1</sup>
$Q_t$	Potencia térmica total	W
$Q_d$	Potência térmica dissipada	W
$T_d$	Temperatura máxima	K
$T_n$	Temperatura mínima	K
$U$	Coeficiente de transferência térmica	W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup>

## **Lista de acrónimos**

IEA	Agência Internacional de Energia
AQS	Águas quentes sanitárias
UV	Ultravioleta
RCCTE	Reglamento das características de comportamento térmico de edifícios
PP	Polipropileno
EPS	Poliestireno expandido

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento e motivação

As exigências do desenvolvimento industrial e tecnológico e as comodidades da vida moderna fizeram, nas últimas décadas, disparar o consumo mundial de energia representando nos dias de hoje umas das principais necessidades da sociedade.

A energia atualmente utilizada advém maioritariamente dos combustíveis fósseis [1], classificados como fontes de energia não renováveis, embora nem sempre tenha sido deste modo. Os combustíveis fósseis são classificados como fontes de energia não renovável dado que o ciclo de renovação das matérias-primas que lhe dão origem é de centenas de milhões de anos, encontrando-se na natureza em quantidades limitadas.

Durante muito tempo a exploração energética foi feita através de tecnologias rudimentares, recorrendo apenas a fontes de energias renováveis e aproveitamento de outras como a proveniente da combustão de madeira. No século XVIII este cenário modificou-se radicalmente. Esse século foi marcado pelo início da revolução industrial na Europa onde se começou a utilizar energias não renováveis. Primeiramente surgiu o carvão e com o rápido crescimento que se verificou no setor industrial foi necessário a introdução de novas fontes de energia, nomeadamente, o petróleo e o gás natural. Devido à crescente evolução ocorrida desde da revolução industrial a utilização de energias não renováveis aumentou drasticamente causando uma elevada dependência energética.

O grande progresso tecnológico e industrial foi, sem dúvida, impulsionado pela descoberta de combustíveis fósseis. Porém, o consumo exagerado e irracional levou à intensificação do efeito de estufa, causado maioritariamente pela emissão de dióxido de carbono, provocando o aquecimento global e agravamento da poluição atmosférica. Por outro lado, o transporte deste tipo de energia, mais concretamente do petróleo, é muito perigoso. Ao longo da história já se registaram diversos desastres ecológicos, que provocaram a morte de muitas espécies e destruição do meio ambiente envolvente, causados por exemplo via acidentes com navios petroleiros.

A emissão de dióxido de enxofre proveniente da queima de combustíveis fósseis é a principal causa de formação de chuvas ácidas e, como consequência, por exemplo mais de metade das florestas situadas no Norte da Europa já se encontram danificadas [2].

Segundo diversos estudos [2],[3],[4] prevê-se um aumento acentuado da população mundial nos próximos anos e, consequentemente, as necessidades energéticas também irão aumentar. O gráfico da figura 1.1 mostra esta provável evolução. Também é sabido que o maior aumento de população será esperado nos países em desenvolvimento.

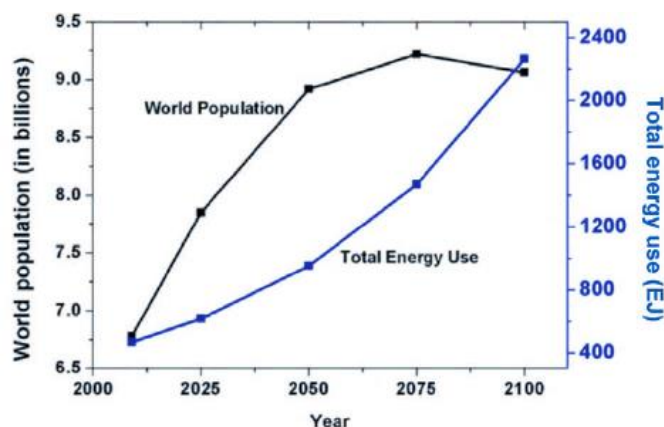


Figura 1.1- Evolução populacional e consumo de energia em EJ (10<sup>18</sup> Joule) previsto até 2100 [5].

Dado a previsão de aumento de consumo e tendo em conta que a taxa atual de consumo já é superior à produção que o planeta permite, o uso desta fonte de energia deixou de ser sustentável. Ao longo das próximas décadas será necessário dar resposta à crescente escassez de petróleo por forma a alcançar a segurança energética, combater a degradação ambiental e atender às crescentes necessidades dos países em desenvolvimento [3].

A utilização eficiente de recursos energéticos renováveis, nomeadamente a energia solar, é cada vez mais apontado como a solução para o aquecimento global e também como meio para alcançar um desenvolvimento sustentável para todos os seres vivos e natureza [6]. Entenda-se por desenvolvimento sustentável como sendo o desenvolvimento que corresponde às necessidades presentes sem comprometer a capacidade de crescimento das gerações futuras. O investimento em energias renováveis não é unicamente motivado por questões ambientais, mas também por fatores económicos e políticos [3]. Dado que os principais países produtores de petróleo são politicamente instáveis, o preço e disponibilidade deste recurso torna-se também instável [3].

O uso de energias renováveis, principalmente a energia solar, apresentou um grande impulso durante a segunda metade da década de 1970, logo após a primeira grande crise do petróleo [7] refletida por um aumento drástico do seu preço nível global. Naquela altura as questões económicas foram o fator mais importante e o interesse nas energias renováveis abrandou quando o preço do petróleo diminuiu.

Ao contrário das energias não renováveis, as renováveis são teoricamente inesgotáveis, como é o caso da energia solar. A energia solar é limpa, amiga do ambiente e disponível livremente sobre toda a Terra [8].

Uma das formas de aproveitamento de energia solar é através da utilização de sistemas solares térmicos vulgarmente conhecidos por painéis ou coletores solares térmicos. Dados da Agência Internacional de Energia (IEA) referentes a 2014 indicam que com o uso de tecnologias solares térmicas foi possível, nesse ano, produzir energia no valor de 335 TWh o que permitiu uma poupança energética de 36.1 milhões de toneladas de petróleo e 116.4 milhões de toneladas de dióxido de carbono [10]. Ainda assim, a energia produzida por exemplo nesse ano, 335 TWh que corresponde a aproximadamente 1.2 EJ, é muito baixa comparativamente à energia total consumida no planeta, como se pode observar pela análise da figura 1.1.

No caso particular de Portugal, que apresenta uma elevada dependência energética, com valores entre os 70% e 90% verificou-se ao longo do período de 2005 a 2014 uma diminuição de cerca de 15% na dependência energética do exterior [11]. Porém, face a 2015 este valor sofreu uma ligeira subida. Segundo a Direção Geral de Energia e Geologia em 2015 registou-se uma dependência energética no valor de 78.3%, superior ao ano 2014 em que o seu valor foi de 72.4%. Relativamente ao consumo de energias renováveis por setor registou-se, ao longo dos últimos anos, que o setor doméstico apresenta o maior consumo de energias renováveis com valores em torno de 70%. Os países importadores de petróleo, como é o caso de Portugal, ao investirem em energias renováveis estão a reduzir a sua dependência energética uma vez que estas podem ser produzidas internamente.

Na figura 1.2 é apresentado o consumo de energia, a nível mundial, por setor. Verifica-se que os setores referentes aos transportes, indústrias e habitações são os que consomem praticamente toda a energia produzida mundialmente.

Uma parte significativa da energia consumida numa habitação corresponde à produção de águas quentes sanitárias (AQS) e este ainda é maioritariamente feito através do uso de esquentadores elétricos ou a gás.

O uso de sistemas solares térmicos em vez dos tradicionais métodos permite reduzir significativamente os custos de energia para o aquecimento de água dado que radiação proveniente do Sol é gratuita e contribui para a diminuição de utilização de combustíveis fósseis.

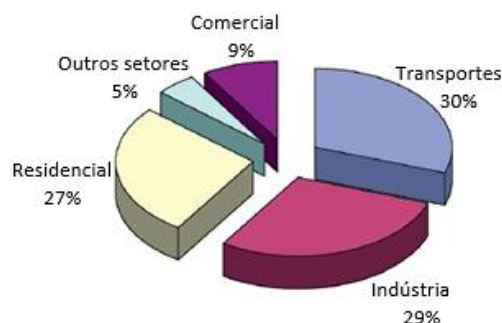


Figura 1.2 - Consumo mundial de energia por setor. Adaptada de [5].



O aproveitamento de energia solar sempre esteve presente, desde os tempos primórdios mas, só em 1891 foi comercializado o primeiro sistema solar para aquecimento de água que aquecia água a uma temperatura de aproximadamente 39 °C em dias ensolarados [9]. Este era composto essencialmente por uma caixa coberta de vidro e, no seu interior continha um recipiente de armazenamento pintado de preto. Desde então diversas tecnologias e sistemas inovadores têm sido desenvolvidos para aplicações no setor doméstico.

Um dos maiores obstáculos no aquecimento de água através da energia solar deve-se ao elevado custo associado aos sistemas tradicionais. A substituição de alguns materiais que compõem estes sistemas, como por exemplo os metálicos e vidro, por materiais poliméricos é apontada como uma alternativa promissora [12]. O uso de materiais poliméricos poderá levar a reduções significativas uma vez que os custos associados aos processos de transformação envolvendo polímeros é menor do que o verificado para transformação dos materiais tradicionais e, conseqüentemente o sistema final apresentará um menor custo de fabricação. Nos últimos anos têm sido desenvolvidos sistemas baseados em materiais poliméricos porém, a sua utilização ainda é muito baixa comparativamente aos sistemas tradicionais e são basicamente aplicados apenas no aquecimento de água de piscinas.

Os materiais poliméricos apesar de apresentarem menor custo e peso leve revelam, por vezes, problemas de degradação quando expostos a longo prazo a elevadas temperaturas e a radiação ultravioleta (UV) perdendo algumas das suas propriedades [13]. Isto requer que o custo final de sistemas solares poliméricos e a vida útil dos materiais que os compõem sejam comparáveis aos sistemas tradicionais [14]. Atualmente, os coletores solares existentes no mercado apresentam um tempo médio de vida de cerca de 20 anos se forem anualmente realizadas manutenções preventivas para que não diminuam a sua eficiência.

Outro fator importante para os consumidores, além do baixo custo, refere-se ao aspeto estético. Na figura 1.3 têm-se a imagem de um projeto de sistema solar totalmente polimérico desenvolvido pela Task39 em parceria com a Aventa, uma empresa situada na Noruega. O sistema foi integrado na fachada de uma habitação como elemento de construção revelando-se arquitetonicamente atraente.



Figura 1.3 - Sistema solar térmico polimérico integrado na fachada de uma habitação, situada em Oslo [15].

## 1.2 Objetivos

A necessidade da existência de sistemas para produção de AQS economicamente mais atrativos impulsionou a realização desta dissertação. Neste âmbito, os principais objetivos enquadram-se na construção e estudo de três protótipos de coletor solar térmico do tipo termossifão, em formatos diferentes, construídos essencialmente com materiais poliméricos de baixos custos, peso leve e de simples montagem que facilmente possam ser colocados à venda no mercado global.

O que diferencia o coletor solar térmico que aqui se propõe dos já existentes é a utilização de um absorsor num novo tipo de material, conceito que será explicado numa das secções seguintes.

Apesar de já existirem no mercado coletores para AQS poliméricos ainda não existe nenhum na configuração termossifão.

A dissertação apresentada encontra-se subdividida nas seguintes etapas:

- Conceitos teóricos para compreensão do funcionamento de sistemas solares térmicos;
- Simulação 2D/3D dos protótipos;
- Descrição dos materiais utilizados;
- Processo de construção e montagem;
- Implementação de software de controle;
- Realização de testes e simulação de consumos;
- Apresentação e discussão de resultados.

A construção e montagem dos protótipos foi realizada nas instalações das empresas OpenPlus, situada na zona industrial de Estarreja, Prirev e J.Prior, estas últimas localizadas no concelho de Vagos.

### 1.3 Energia solar

O Sol é a fonte de energia renovável mais abundante no planeta, emitindo radiação a uma taxa de  $3.8 \cdot 10^{23}$  kW, da qual aproximadamente  $1.8 \cdot 10^{14}$  kW é interceptada pela Terra. Cerca de 60% deste valor, ou seja  $1.08 \cdot 10^{14}$  kW, atinge a superfície terrestre e a restante radiação, 40%, é refletida para o espaço ou absorvida pela atmosfera [16]. A potencialidade do uso da energia solar é tal que caso 0.1% da energia que chega à superfície terrestre fosse convertida com uma eficiência de 10% geraria cerca de quatro vezes a capacidade de geração total do planeta [16].

A quantidade de radiação recebida à superfície da Terra não é uniforme uma vez que o movimento da Terra em redor do Sol é descrito por uma elipse, como exemplificado na figura 1.4.

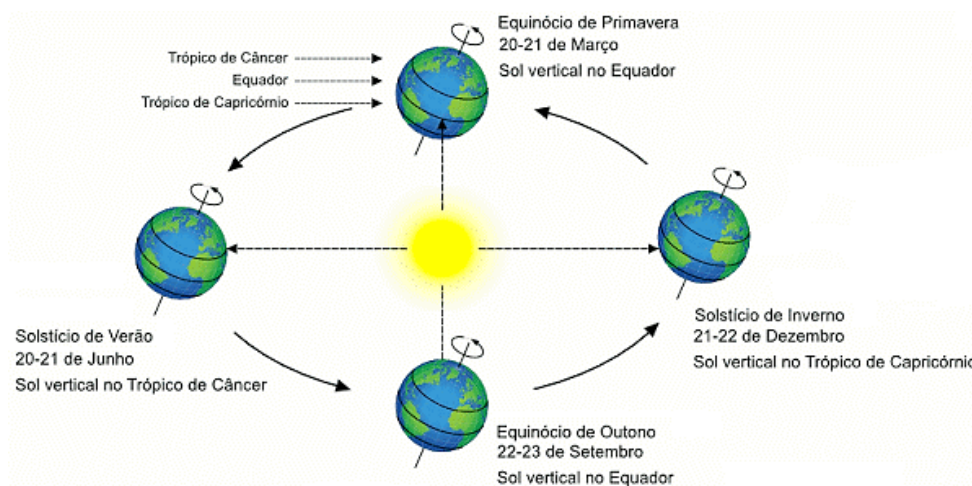


Figura 1.4 – Movimento da Terra em torno do Sol ao longo do ano com indicação dos solstícios em relação ao Hemisfério Norte. Adaptada de [17].

O seu espectro de radiação apresenta um comportamento muito semelhante ao exibido por um corpo negro à temperatura de aproximadamente 5760 Kelvin [18]. Um corpo negro ideal é aquele que absorve toda a radiação eletromagnética nele incidente, ou seja, nenhuma radiação é transmitida ou refletida. Também é caracterizado por ser um emissor ideal de radiação [19]. Na figura 1.5 é apresentado o espectro de emissão de radiação para um corpo negro em função do comprimento de onda, para diferentes temperaturas. Conhecendo o valor de temperatura a que um corpo negro se encontra é possível, através da Lei de Planck, determinar o seu espectro de emissão.

A energia irradiada pelo sol é composta maioritariamente por radiação de pequenos comprimentos de onda na gama 0.25  $\mu\text{m}$  a 3.0  $\mu\text{m}$  [20], [21].

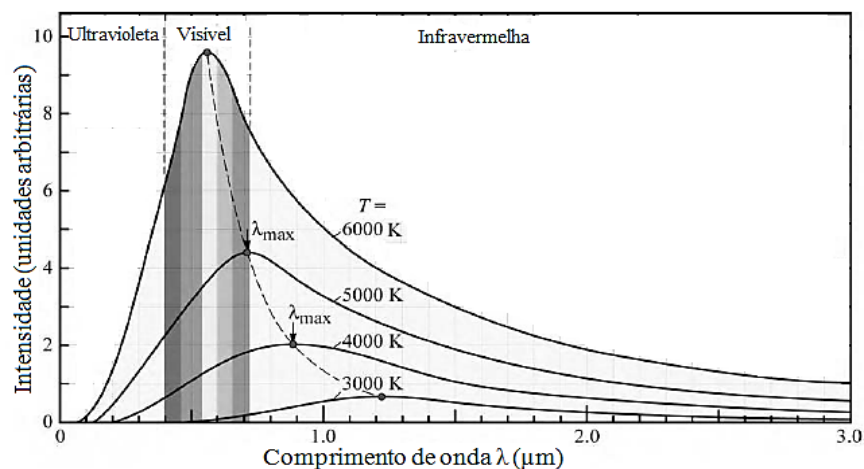


Figura 1.5 - Espectro de emissão de radiação do corpo negro. Adaptada de [22].

Quando radiação atinge um corpo pode ser absorvida, refletida e, ou transmitida, como exemplificado na figura 1.6. A quantidade de energia que é absorvida, a que é refletida e a transmitida depende das características do próprio material sendo indicada pela sua capacidade de absorvância, refletância e transmitância, respetivamente. Deste modo, a absorvância é dada pelo quociente entre o fluxo de radiação absorvido pelo material e o fluxo de radiação incidente, a refletância pelo quociente entre o refletido e a radiação incidente e a transmitância pelo quociente entre o transmitido e a radiação incidente. De acordo com a lei de conservação de energia a soma destas três componentes é igual a uma unidade, ou seja, à totalidade da radiação incidente.

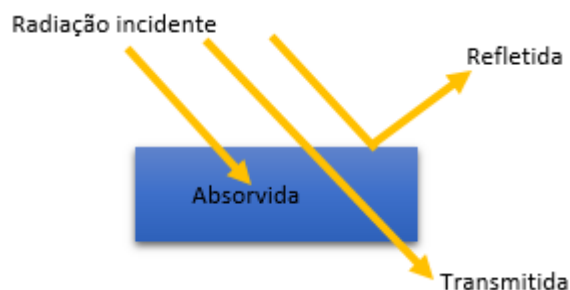


Figura 1.6 - Representação esquemática dos processos envolvidos entre radiação incidente e um corpo.

A radiação absorvida por um corpo é responsável pelo seu aumento de temperatura e consequentemente ocorrência de emissão de radiação térmica. A capacidade em emitir radiação designa-se emissividade e é determinada pela relação entre a energia emitida pelo corpo e a energia emitida por um corpo negro ideal, para a mesma temperatura.

## 1.4 Sistemas solares térmicos

Um dos principais elementos que compõe um sistema solar térmico é denominado coletor. Coletor solar térmico é um dispositivo que capta a radiação solar incidente, converte-a em energia térmica e, transfere esse calor para o fluido que circula no interior do próprio coletor [23]. Os coletores solares térmicos podem apresentar diversas configurações, como por exemplo, os planos *unglazed* (sem cobertura), os planos com cobertura, os de tubos de vácuo, os concentradores, etc.

A escolha de um coletor deve ser feita de acordo com a gama de temperatura desejada. Na figura 1.7 é apresentado um gráfico de eficiência, para diferentes tipos de coletores, em função da diferença entre a temperatura do coletor e a temperatura ambiente requerida. Por exemplo, para o aquecimento de água de piscinas os coletores *unglazed*, indicado na figura por *absorber*, são os mais utilizados devido ao elevado rendimento que apresentam na gama de baixas temperaturas e, também ao seu custo inferior comparativamente a outros tipos de coletores, em virtude da simplicidade do seu sistema.

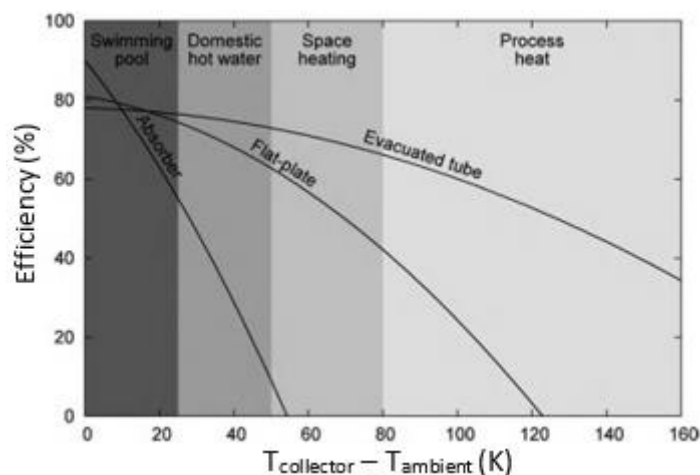


Figura 1.7 - Eficiência de diferentes tipos de coletores em função do ganho de temperatura [24].

#### 1.4.1 Sistemas solares térmicos para AQS

Os coletores solares planos com cobertura são os sistemas mais empregues no setor doméstico para AQS. Um coletor solar plano é composto por uma placa absorvora (designada também absorsor), uma cobertura transparente e tubos onde circula o fluido. Quando radiação, proveniente do Sol, atravessa a cobertura transparente e atinge a superfície absorvora uma grande parte é absorvida e transferida sob a forma de calor para o fluido [25]. Os tubos, onde circula o fluido, podem estar soldados ao absorsor ou mesmo serem parte integrante do próprio absorsor [26]. O absorsor encontra-se, geralmente, dentro de uma caixa aberta na parte superior e envolto num material isolante para que deste modo esteja isolado dos lados e na sua parte inferior reduzindo assim perdas por condução [26]. A caixa, onde o coletor se encontra inserido, confere rigidez ao sistema e protege-o de condições climáticas adversas como por exemplo ventos fortes. Na figura 1.8 é apresentado um esquema de coletor solar plano com indicação do balanço energético quando nele atinge radiação solar.

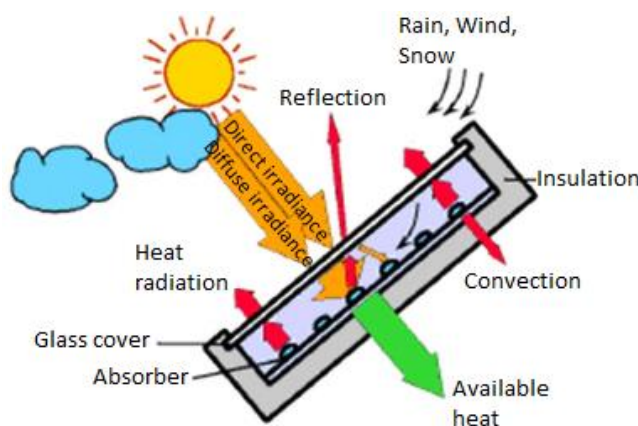


Figura 1.8 - Representação esquemática do balanço energético num coletor plano [25].

Dado que a cobertura transparente tem como função transmitir o máximo de radiação incidente para o absorsor o material constituinte deve apresentar elevada transmitância para pequenos comprimentos de onda (ver figura 1.5) [8]. A sua utilização permite, devido a ser opaco para longos comprimentos de onda, minimizar as perdas por radiação térmica emitida pelo absorsor criando assim um ‘efeito de estufa’ [26]. A ausência de cobertura implica elevadas perdas térmicas e consequentemente menor rendimento, tal como verificado anteriormente para os coletores *unglazed*, revelando assim a sua importância na minimização de perdas.

O vidro tem sido amplamente utilizado como cobertura pois pode transmitir até 90% da radiação solar incidente de pequeno comprimento de onda e, não transmite praticamente radiação de longo comprimento de onda [8],[26]. Além do vidro, materiais poliméricos também podem ser usados devido à elevada transmitância que apresentam para radiação de pequeno comprimento de onda [8].

O absorsor representa o componente mais importante de todo o sistema. Como já mencionado, tem como função converter a radiação absorvida em energia térmica e transferi-la para o fluido com o mínimo de perdas possível sendo necessário que o material utilizado apresente elevada absorvância e baixa emissividade [8]. Pode-se assumir que o absorsor se comporta como um corpo negro e deste modo é possível ter noção do seu espectro de emissão. A partir da análise da figura 1.5 verifica-se que à medida que a temperatura, a que se encontra um corpo negro, diminui a sua gama de emissão desloca-se para maiores comprimentos de onda. Assumindo que o absorsor pode, por exemplo, apresentar uma temperatura de 350 K a sua gama de emissão situa-se na de grandes comprimentos de onda (superior a 3.0  $\mu\text{m}$ ) que corresponde à radiação infravermelha sendo esta a razão pela qual o material utilizado como cobertura transparente deva apresentar transmitância quase nula nessa gama.

Os materiais geralmente utilizados para absorsor são o cobre, alumínio ou aço [8]. Porém, os absorsores baseados em metais são mais propensos à corrosão o que é desvantajoso pois diminui o seu tempo de vida útil. O uso de absorsores baseados em polímeros são uma alternativa porque apresentam maior resistência à corrosão, são materiais mais leves, baratos e fáceis de fabricar [27]. Os absorsores poliméricos já existem no mercado há alguns anos mas o seu uso ainda é somente empregue em coletores solares *unglazed* para o aquecimento de piscinas, baseados em materiais como polipropileno e polietileno de baixa densidade [28].

O absorsor é normalmente revestido com tinta de cor preto-baço ou com um revestimento seletivo. O revestimento com tinta embora confira elevada absorção também apresenta elevada emissão que se traduz em elevadas perdas térmicas. O revestimento seletivo refere-se à adição de uma ou mais camadas de um dado material ao absorsor que irão, de acordo com as suas características óticas, potenciar a capacidade de absorção e minimizar as perdas por emissão. Por exemplo, um absorsor em cobre com revestimento seletivo em óxido de cobre apresenta absorvância de valor 0.90 e emissividade de valor 0.11 [29]. Por outro lado, um absorsor revestido com tinta de cor preta apesar de ter elevada absorvância, próximo de 0.90, o valor de emissividade pode ser próximo de 0.70 [24].

As propriedades óticas da cobertura transparente e do absorsor são então um fator determinante no desempenho de um coletor solar [25].

O isolamento térmico, como já mencionado, tem como função a redução de perdas térmicas por condução e para tal deve apresentar um baixo coeficiente de condutividade térmica. O coeficiente de condutividade térmica de um material caracteriza a capacidade da sua eficiência na transferência de calor, expresso usualmente em  $\text{W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$  ou  $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$  [30]. Segundo o Regulamento das características de comportamento térmico dos edifícios (RCCTE) é necessário que o coeficiente de condutividade térmica seja inferior a  $0.065 \text{ W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$  para ser classificado como isolante térmico [31]. Uma vez que se encontra em contacto com o absorsor deverá ter a capacidade de suportar temperaturas elevadas sem se danificar. Normalmente, como isolante, é utilizado lã mineral ou um material à base de poliuretano [24] com espessura de 50 mm.

A disponibilidade da radiação solar nem sempre coincide temporalmente com o consumo de água quente havendo a necessidade de armazenar a energia obtida a partir dos coletores. Para tal é utilizado um tanque de armazenamento térmico que para além de servir como sistema de armazenamento de água quente também deve assegurar isolamento por forma a garantir o mínimo

de perdas térmicas para o exterior. Geralmente os tanques de armazenamento são fabricados em materiais como o aço ou alumínio [5]. O tanque deve possuir dimensões que permitam a ocorrência de fenômenos de estratificação térmica no seu interior. Os fenômenos de estratificação térmica caracterizam-se pela disposição da água ao longo do tanque em que, a água mais quente (menor densidade) flui para o topo do reservatório e a mais fria (maior densidade) encontra-se na parte mais baixa.

De acordo com a circulação do fluido térmico os sistemas podem subdividir-se em dois grupos, do tipo passivo ou do tipo ativo. Ao contrário do que se verifica num sistema passivo, num sistema ativo faz-se uso de uma ou mais bombas para o fluido térmico circular entre o coletor e o tanque de armazenamento sendo esta a principal diferença que distingue um sistema do outro. Os sistemas passivos são dependentes da circulação natural do fluido térmico e são divididos em duas categorias, sistema termossifão e sistema de armazenamento integrado [27].

No sistema termossifão o fluido circula por convecção natural sempre que haja diferença de densidade entre o fluido que se encontra no coletor e o que se encontra armazenado [20]. Ou seja, quando o coletor recebe radiação solar o fluido que nele se encontra aquece tornando-se menos denso e sobe através do coletor até ao tanque de armazenamento [26]. O fluido mais frio que se encontra no tanque ao ser mais denso desce e entra no coletor. Nas figuras 1.9 a) é exemplificado o modo como ocorre a circulação de água devido ao fenómeno de convecção e 1.9 b) sistema termossifão aplicado no telhado de uma habitação. Os tubos, onde circulam o fluido, estão dispostos paralelamente e unem-se nas extremidades. Durante a noite ou sempre que a temperatura fora do tanque seja inferior à de dentro, a direção de fluxo reverterá isto é, passagem de água quente do tanque para o coletor, e deste modo perda de calor para o ambiente arrefecendo a água armazenada [26],[21]. Para evitar a ocorrência do fluxo inverso é necessário que o tanque de armazenamento esteja colocado acima do coletor sendo geralmente aconselhado uma distância de pelo menos 30 centímetros entre o topo do coletor e o fundo do tanque [26],[21]. A necessidade de o tanque estar colocado acima do coletor torna este tipo de sistemas relativamente altos o que por vezes os torna pouco atrativos esteticamente.

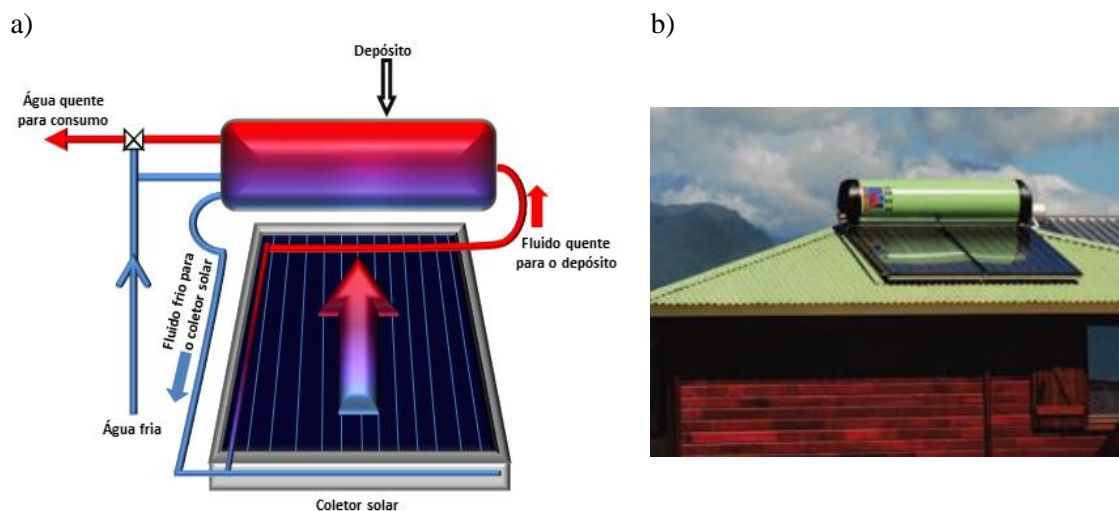


Figura 1.9: - Sistema solar térmico do tipo termossifão: a) Modo de circulação [32]; b) Aplicação no telhado de uma habitação [24].

No sistema de armazenamento integrado a superfície do tanque de armazenamento é usada como absorvedor e deste modo formam uma só unidade [33]. A sua simplicidade, comparada com outros tipos de sistemas de aquecimento de água, confere-lhe um baixo custo de aquisição e fácil instalação [34]. Na figura 1.10 é apresentada uma configuração possível para um sistema de armazenamento integrado. A configuração deste sistema resulta em elevadas perdas térmicas para o



exterior sobretudo durante a noite portanto são mais adequados a regiões que apresentem, todo o ano, clima com temperaturas elevadas.

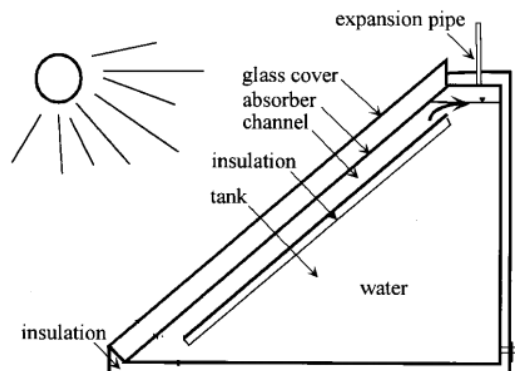


Figura 1.10 - Sistema solar térmico de armazenamento integrado [35].

No sistema ativo, também designado por sistema de circulação forçada, a bomba de circulação é ativada sempre que a temperatura do fluido no coletor é superior, num valor pré-determinado, à temperatura da água para consumo que se encontra na parte mais baixa do tanque de armazenamento, promovendo o seu transporte até ao tanque. No tanque, o fluido quente transfere o seu calor para a água através de um permutador. Ao ocorrer transferência de calor a água aquece e o fluido arrefece retomando de novo ao coletor para ser novamente aquecido, através da radiação solar, e repetir o ciclo. Como o tanque não necessita de estar perto do coletor, o sistema de circulação forçada apresenta menor impacto a nível estético. Na figura 1.11 é exemplificado um esquema de sistema de circulação forçada com uso de permutador do tipo serpentina.

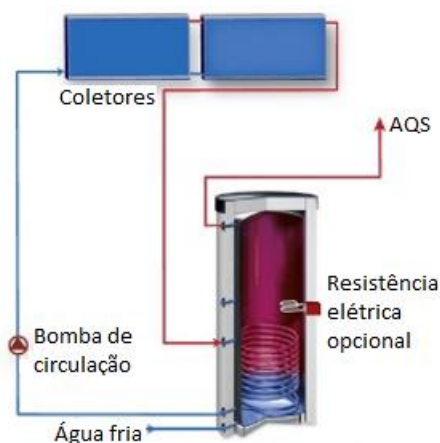


Figura 1.11 - Sistema solar térmico de circulação forçada [59].

Os sistemas ativos apresentam geralmente valores de eficiência superiores aos exibidos por sistemas passivos [36].

Todavia os sistemas ativos são mais complexos e dependentes de corrente elétrica devido ao uso de uma ou mais bombas para fazer circular o fluido tornando-os dispendiosos comparativamente aos sistemas passivos, que não requerem energia elétrica para operarem.

De acordo com a necessidade ou não do uso de permutador de calor os sistemas solares térmicos podem ainda ser classificados em sistemas indiretos (fechados) ou sistemas diretos (abertos) [25]. Nos sistemas de circulação direta não se utiliza permutador de calor pelo que o fluido que circula nos coletores é a água de consumo. Os sistemas diretos são indicados para zonas onde predominem climas mais quentes, ou seja, onde não haja perigo de ocorrer congelamento do fluido. Apresentam como vantagem não ser necessário o uso de permutador o que se traduz numa diminuição no custo total de todo o sistema comparativamente ao sistema ativo, contudo, neste tipo de configuração o coletor está sujeito à ação da água da rede que pode danificar os componentes diminuindo o seu tempo de vida útil.

Nos sistemas de circulação indireta o fluido que circula nos coletores não se mistura com a água que se irá consumir sendo que a transferência de calor do fluido para a água de consumo é feita através de permutação. O uso de um permutador de calor é essencial para evitar degradação dos coletores devido à corrosão e depósitos de calcário causado pela má qualidade da água e também para os proteger de congelamento [8] uma vez que não se utiliza água diretamente da rede e há a possibilidade do uso de anticongelante (conceito explicado na secção seguinte) no circuito fechado. Os permutadores podem ser de uso externo ou interno. Os permutadores de uso externo são colocados

na parte de fora do tanque de armazenamento e os de uso interno dentro do tanque sendo exemplo de cada um destes permutadores de placas e serpentina, respetivamente.

Na figura 1.9 têm-se o exemplo de um sistema de circulação direta e na figura 1.11 de circulação indireta com uso de permutador em serpentina, no entanto, é importante salientar que também há sistemas termossifão que fazem uso de permutador tal como exemplificado na figura 1.12. Em ambos os sistemas apresentados nas figuras 1.11 e 1.12 o fluido que circula no permutador é o proveniente dos coletores, todavia é possível que no permutador se encontre a água para consumo e no tanque o fluido que é aquecido nos coletores, tal como se irá ser proposto nesta dissertação.

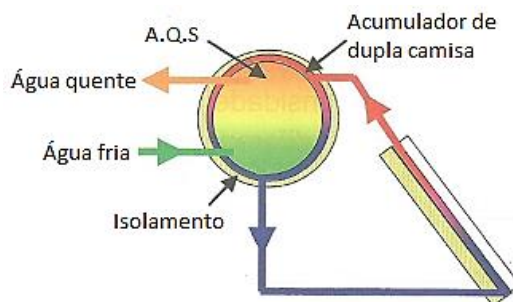


Figura 1.12 – Sistema solar térmico do tipo termossifão com permutador [60].

### 1.4.2 Fenómenos de congelamento e sobreaquecimento

Os coletores solares quando são expostos às condições climatéricas devem estar protegidos dos danos causados pelos fenómenos de congelação e de sobreaquecimento. Se os sistemas não tiverem protegidos, por exemplo em relação ao fenómeno de congelação, caso a temperatura exterior ao coletor seja inferior a 0 °C a água que se encontra nos coletores passará do estado líquido ao estado sólido e consequentemente haverá um aumento do seu volume que poderá rebentar com as tubagens. Uma forma de proteger os coletores de congelação é através da adição de uma substância designada anticongelante, ao circuito coletor-permutador, que permite a diminuição da temperatura de fusão do fluido [8]. O anticongelante mais utilizado é o propileno glicol [20].

Durante condições de estagnação ou longos períodos de não utilização de água, por exemplo verificadas na época de verão e férias, a temperatura no coletor pode se tornar muito elevada fazendo com que a pressão aumente [21]. Na superfície de um absorvedor de revestimento seletivo podem ser alcançadas, no estado de estagnação, temperaturas próximas de 200 °C em dias em que a temperatura exterior é muito elevada [37]. O sobreaquecimento deve então ser evitado pois reduz a durabilidade dos componentes sendo que existem soluções para limitar ou mesmo evitar as suas consequências através do uso de válvulas redutoras de pressão ou utilizando sistemas *drain back*.

O *drain back* apenas pode ser aplicado em coletores que funcionem do modo ativo, ou seja com utilização de bomba, em que quando a água atinge a temperatura desejada a bomba de circulação pára e a água contida nos coletores é recolhida para um depósito. A possibilidade dos coletores não conterem água durante certos períodos, devido ao *drain back*, permite que além de serem protegidos de temperaturas elevadas também possam estar protegidos de congelamento [38]. Deste modo, com a utilização de sistemas *drain back* não é necessário a adição de anticongelante [38].

### 1.4.3 Rendimento

O desempenho de um coletor avalia-se pelo seu valor de rendimento, também denominado eficiência, e é definido pelo quociente entre a energia absorvida pelo coletor e a energia incidente. Toda a radiação disponível que não é absorvida pelo sistema é designada de perdas óticas. O método utilizado para determinar o rendimento é descrito pela Norma Europeia EN 12975, utilizada na certificação de painéis solares térmicos. As normas para ensaios de coletores são de extrema importância pois permitem comparar dados de por exemplo rendimento, perdas, entre outros, de diferentes coletores obtidos em condições idênticas.

O rendimento de um coletor solar é dado por:

$$\eta = \frac{Q_u}{A_c I} \quad (1.1)$$



onde  $Q_u$  representa a potência térmica útil obtida pelo coletor (W),  $A_c$  a área do coletor ( $m^2$ ) e  $I$  a potência da radiação incidente por unidade de área ( $W.m^{-2}$ ).

A potência térmica útil é dada por:

$$Q_u = \frac{Q}{\Delta t} \quad (1.2)$$

onde  $Q$  representa a energia útil também denominado calor útil (J) e  $\Delta t$  o intervalo de tempo respetivo (s).

A energia térmica útil é dada por:

$$Q = m C_p \Delta T \quad (1.3)$$

onde  $m$  representa a massa de fluido transferido a partir do absorvedor (kg) determinada a partir do caudal volumétrico,  $C_p$  capacidade térmica mássica do fluido ( $J.kg^{-1}.K^{-1}$ ) e  $\Delta T$  a variação de temperatura do fluido ao atravessar o absorvedor (K), dada por  $T_{out}-T_{in}$ . Entenda-se por capacidade térmica de uma substância a grandeza física que representa a quantidade de energia que é necessária fornecer por unidade de massa para que a sua temperatura eleve 1 grau e, a quantidade de energia que é necessário libertar para que a sua temperatura diminua 1 grau. Usualmente é expressa em  $J.kg^{-1}.K^{-1}$  mas, também pode ser expressa em  $cal.g^{-1}.^{\circ}C^{-1}$ , onde cal representa calorias e g gramas.

O rendimento é intrinsecamente dependente das características construtivas do coletor mais concretamente das características óticas da cobertura transparente e do absorvedor, nomeadamente, dos seus valores de refletância, absorvância, transmitância e emitância. Deste modo, o rendimento é descrito através de três parâmetros que são a eficiência ótica,  $\eta_0$ , o coeficiente de perdas térmicas ( $W.m^{-2}.K^{-1}$ ),  $a_1$ , e a dependência de temperatura do coeficiente de perdas térmicas ( $W.m^{-2}.K^{-2}$ ),  $a_2$ , que se relacionam do seguinte modo:

$$\eta = \eta_0 - a_1 \frac{T_m - T_a}{I} - a_2 I \left( \frac{T_m - T_a}{I} \right)^2 \quad (1.4)$$

onde  $T_m$  representa a temperatura média do fluido no coletor (K) e  $T_a$  a temperatura ambiente (K). A eficiência ótica é dada pelo produto de transmitância da cobertura transparente e de absorvância do absorvedor.

A temperatura média do fluido é difícil de obter com exatidão, mas é possível determinar com base na temperatura de entrada do fluido,  $T_{in}$ , e a sua variação de temperatura,  $\Delta T$ , do seguinte modo:

$$T_m = T_{in} + \frac{\Delta T}{2} \quad (1.5)$$

A partir de  $T_m$  é possível determinar a diferença de temperatura reduzida ( $m^2.K.W^{-1}$ ) do seguinte modo:

$$T_m^* = \frac{T_m - T_a}{I} \quad (1.6)$$

Os parâmetros que caracterizam um coletor,  $\eta_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  são obtidos experimentalmente através do ajuste estatístico da curva do rendimento (equação 1.3) em função de  $T_m^*$ . A equação de ajuste é então dada por:

$$\eta(T_m^*) = \eta_0 - a_1 T_m^* - a_2 I (T_m^*)^2 \quad (1.7)$$

A forma anteriormente descrita para determinar o rendimento aplica-se a coletores solares que não tenham depósito incorporado, ou seja, a água aquecida é transferida para um depósito de armazenamento à parte do coletor. No caso dos sistemas termossifão, em que o depósito é parte integrante do coletor, este método não é viável porque seria difícil determinar qual a quantidade de massa de fluido que é transferida para o tanque.

Uma vez que nesta dissertação pretende-se efetuar o estudo de coletores na configuração termossifão será considerado o rendimento de todo o sistema, sempre ao longo de 24 horas. Deste modo, considera-se a potência térmica total, ou seja, a soma da potência térmica útil com a potência térmica dissipada. O método utilizado na certificação de coletores do tipo termossifão é descrito pela norma Europeia 12976 todavia, nesta dissertação não se irá seguir os requisitos da norma.

O rendimento para sistemas termossifão, tendo em consideração o comportamento de todo o sistema, é então dado por:

$$\eta = \frac{Q_t}{A_c I} \quad (1.8)$$

onde  $Q_t$  representa a potência térmica total representada por:

$$Q_t = \frac{Q_{u2} - Q_d}{\Delta t} \quad (1.9)$$

A quantidade de calor transferido para a água que se encontra dentro do tanque pode ser determinado a partir da variação de temperatura de água tendo em conta a quantidade de água contida no interior do tanque e o seu calor específico da seguinte forma [39] :

$$Q_{u2} = m_t C_p (T_{t2} - T_{t1}) \quad (1.10)$$

onde  $m_t$  representa a massa de água dentro do tanque (Kg),  $T_{t2}$  a temperatura da água no tempo real (K) e  $T_{t1}$  a temperatura da água no início do dia (K).

Por outro lado, a quantidade de calor dissipada é determinada da seguinte forma:

$$Q_d = m_t C_p (T_d - T_n) \quad (1.11)$$

onde,  $T_d$  representa a temperatura máxima registada durante o dia e  $T_n$  a temperatura mínima registada durante a noite.

No cálculo de rendimento para qualquer tipo de coletor, seja de circulação forçada ou termossifão, os testes devem ser realizados com radiação incidente regular que, no caso de serem realizados ao ar livre e não em laboratório referem-se a um dia de céu completamente limpo. Pois, a presença de nuvens tem como resultado picos de intensidade rápida devido à diminuição e aumento de radiação que terá como consequência alteração nas condições de teste. Também é importante que variáveis como a temperatura ambiente, temperatura do fluido à entrada do coletor e, por exemplo, velocidade do vento, se mantenham constantes.

Na caracterização de um coletor para além do rendimento também é importante conhecer quais as perdas térmicas que apresenta pois, durante a noite ou sempre que não há radiação solar significativa ocorrem perdas térmicas para a atmosfera mesmo com a utilização de bons materiais isolantes. O coeficiente de perdas térmicas instantâneo ( $W.m^{-2}.K^{-1}$ ), também denominado coeficiente de transferência térmica, é dado por:

$$U = \frac{Q_d}{A_c \Delta T_b \Delta t} \quad (1.12)$$

onde  $\Delta T_b$  representa a diferença de temperatura entre a temperatura média da água contida no tanque e a temperatura ambiente, para cada instante de medição e  $\Delta t$  o tempo correspondente a esse período de ocorrência de perdas.

#### 1.4.4 Inclinação e perfis de consumo

A orientação e inclinação em relação ao plano horizontal dos coletores solares são fundamentais para maximizar o aproveitamento de energia solar. Em condições ideais o coletor deverá estar sempre direcionado para o Sol e com uma inclinação de modo a que os raios solares incidam perpendicularmente na superfície absorvedora durante todo o ano [40]. Para tal é necessário o uso de um sistema rotativo capaz de acompanhar a trajetória da Terra em relação ao Sol, exemplificada na figura 1.4, e ainda que seja a solução que possibilita a obtenção de maior aproveitamento não é viável para coletores solares do uso doméstico devido à complexidade que estaria associada e aos elevados custos.

Não havendo a possibilidade da aplicação de um sistema rotativo os coletores devem ter orientação e inclinação que permita maximizar o aproveitamento de energia solar o ano todo. Deste modo, os coletores devem ser orientados diretamente para o Equador, ou seja, virados para o Sul geográfico no Hemisfério Norte e para Norte geográfico no Hemisfério Sul e a inclinação deve ser a latitude do local menos 5° [26], [40]. Por exemplo, o distrito de Aveiro apresenta uma latitude de 40°

N pelo que o ângulo de inclinação ideal será de 35° mas este valor pode ter variação até 10° sem afetar praticamente o rendimento. Os coletores devem ser colocados em locais livre de sombras [41].

Relativamente aos perfis de consumo, em média, numa habitação são consumidos aproximadamente 60 litros de água quente por pessoa num duche a uma temperatura de 45 °C [42].

De acordo com as necessidades energéticas de cada habitação estão disponíveis no mercado sistemas termossifão com diferentes capacidades de armazenamento de água, usualmente, com 150, 200 ou 300 litros. Sistemas com capacidade de 150 e de 200 litros são adequados para famílias até 3 pessoas e 300 litros para famílias compostas por 4 a 5 pessoas. Em relação à área de abertura os sistemas de 150 litros e 200 litros apresentam geralmente uma área, por coletor, na gama 1.8 m<sup>2</sup> a pouco mais de 2 m<sup>2</sup>. Por outro lado, os sistemas com capacidade de 300 litros são geralmente compostos por dois coletores ligados entre si aumentando a sua área de abertura para o dobro, em comparação com os outros dois anteriormente mencionados. Na figura 1.9 b) tem-se a imagem de um sistema termossifão aplicado num telhado composto por 2 coletores.

Para sistemas com capacidade de 300 litros são utilizados 2 ou mais coletores em vez de um único, com a área total pretendida, devido aos elevados custos de fabricação que estariam associados, sendo mais viável a fabricação de coletores com apenas um dado tamanho, independentemente da capacidade do sistema a que serão empregues.

## 2. APRESENTAÇÃO E DESCRIÇÃO DOS PROTÓTIPOS

---

### 2.1 Protótipos desenvolvidos

No âmbito desta dissertação foram desenvolvidos três protótipos, ambos sistemas para AQS do tipo termossifão, mas em diferentes configurações, nomeadamente:

- Protótipo 1: Coletor do tipo termossifão sem cobertura transparente e sem permutador;
- Protótipo 2: Coletor do tipo termossifão com cobertura transparente e sem permutador;
- Protótipo 3: Coletor do tipo termossifão com cobertura transparente e permutador.

### 2.2 Simulação 2D/3D e descrição dos materiais

A simulação em formato 2D e 3D dos protótipos, apresentada a seguir, foi desenvolvida em software SolidWorks. As cores apresentadas para cada componente e protótipos, à exceção do absorsor que é efetivamente todo de cor negra, são meramente representativas.

#### 2.2.1 Absorisor

O absorsor, tal como referido no Capítulo 1, é o componente principal num coletor solar uma vez que é responsável por absorver a radiação incidente e posteriormente transferi-la sob a forma de calor para o fluido. O absorsor escolhido foi uma placa de compósito à base de polipropileno, também conhecido pela abreviatura PP, fornecido pela Aventa A.S. - Noruega. O absorsor foi produzido pela técnica de extrusão. Salienta-se que a composição da matéria-prima não se encontra disponível.

O absorsor produzido é constituído por canais, como se pode visualizar na figura 2.1 b), através dos quais flui a água (a cor cinza apenas serve para se conseguir visualizar os canais) e estão unidos por um canal comum no seu fundo.

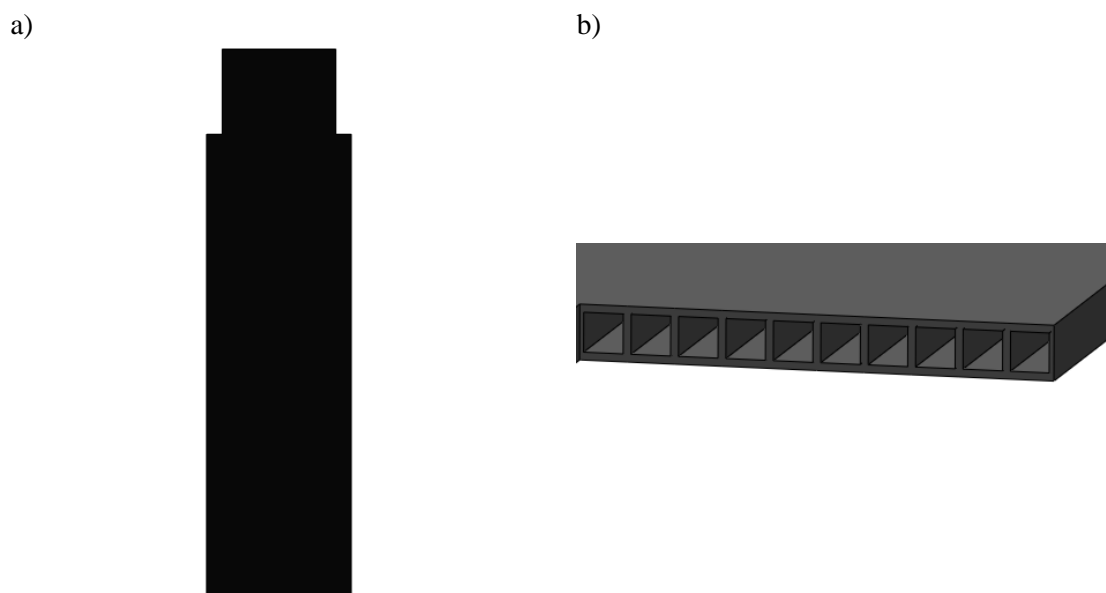


Figura 2.1 – Representação do absorsor.

Dimensão do absorsor: largura = 560 mm; 2130 mm;  
Dimensão dos canais: largura = 5 mm; altura = 5 mm;  
Capacidade do absorsor  $\cong$  5 litros.

### 2.2.2 Cobertura transparente

A utilização de coberturas transparentes baseadas em materiais poliméricos ao invés das tipicamente tradicionais, vidro, destacam-se essencialmente pelo seu peso reduzido e capacidade de transmissão de radiação solar incidente tornando deste ponto de vista a sua utilização vantajosa.

O material polimérico escolhido para a cobertura transparente foi policarbonato alveolar. O policarbonato alveolar, em formato de chapas, é composto por camadas de policarbonato interligadas por alvéolos que lhe confere maior rigidez e resistência ao impacto [43]. A sua resistência ao impacto é cerca de 200 vezes superior à exibida por vidro temperado [44].

O policarbonato possui elevada capacidade de transmissão de radiação, cerca de 81%, e elevada estabilidade térmica uma vez que a temperatura máxima a que pode estar exposto sem ocorrer qualquer tipo alteração das suas propriedades é de 120 °C [43]. Devido à sua baixa condutividade térmica, com valores na gama 0.19 - 0.22 W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup> [45], garante-se isolamento térmico reduzindo assim as perdas por convecção.

Os baixos custos associados à produção de policarbonato [46], o seu peso leve, a transparência semelhante ao vidro [47] combinado com as propriedades já mencionadas revelam que este material é adequado para ser empregue como cobertura transparente. Salienta-se ainda que as placas usadas contém um tratamento para evitar uma degradação muito rápida da estrutura polimérica devido aos raios UV.

Nas figuras 2.2 a) e b) está representada a cobertura transparente e tal como o absorsor também é do tipo alveolar “quadrado”.

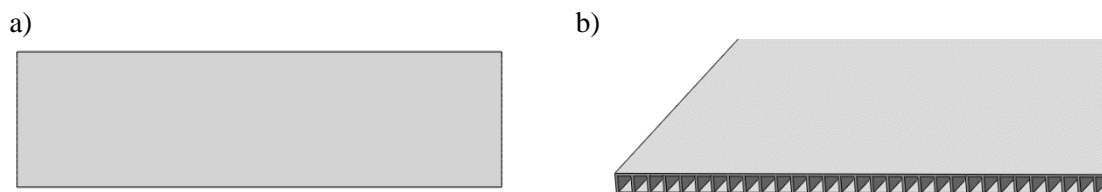


Figura 2.2 – Representação da cobertura transparente.

### 2.2.3 Tanque

O material escolhido para a construção do tanque foi o polipropileno e sua escolha deve a ter de ser do mesmo material que o absorsor para que seja possível uni-los através do processo de soldagem, como será descrito no Capítulo 3.

O polipropileno é um termoplástico de baixa densidade, tipicamente com valor 0.9 g.cm<sup>-3</sup>, sendo um dos mais leves entre os termoplásticos mais amplamente utilizados [48]. As principais características que tornam este material atrativo além do seu baixo custo são boa resistência à fadiga, à presença de produtos químicos, à fissuração por agentes atmosféricos, apresentando também, elevada rigidez, dureza, durabilidade e é soldável [49], [50].

O polipropileno apresenta condutividade térmica no valor de 0.22 W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup> a 20 °C [48]. Apesar do seu baixo valor de condutividade térmica quando comparado com metais não permite neste caso em concreto ter capacidade de isolamento contra mudanças de temperaturas externas devido à espessura bastante reduzida que é utilizada.

A temperatura máxima de uso contínuo a que o polipropileno pode estar sujeito sem sofrer qual tipo de alteração ou deformação é de 100 °C [51]. O polipropileno quando exposto de forma prolongada à luz solar direta pode sofrer deterioração das suas propriedades devido sobretudo à radiação UV e, apresenta uma baixa resistência à oxidação quando em contacto com certos materiais como por exemplo o cobre [48]. Ainda assim, é um material adequado para o tanque devido a todas as suas características atrativas e baixo custo.

Nas figuras 2.3 a) e b) é representado o tanque utilizado para os protótipos 1 e 2. A furação no topo, visível na figura 2.3 a), refere-se à entrada para colocação de uma bacia que conterá no seu interior sondas de temperatura e, as furações próxima da base e próxima do topo na parte de trás do

tanque visíveis na figura 2.3 b) referem-se à entrada de água fria da rede e saída de água quente, respetivamente.

O protótipo 3 contém um permutador e é através deste que ocorre a entrada de água fria da rede e a saída de água quente. Deste modo não é necessário a existência de furações na parte de trás do tanque, mas apenas no seu topo, como se pode visualizar na figura 2.3 c) e d). Tal como nos protótipos 1 e 2 também contém no topo furação para colocação de uma bainha.

O tanque apresenta uma capacidade de 71 litros.

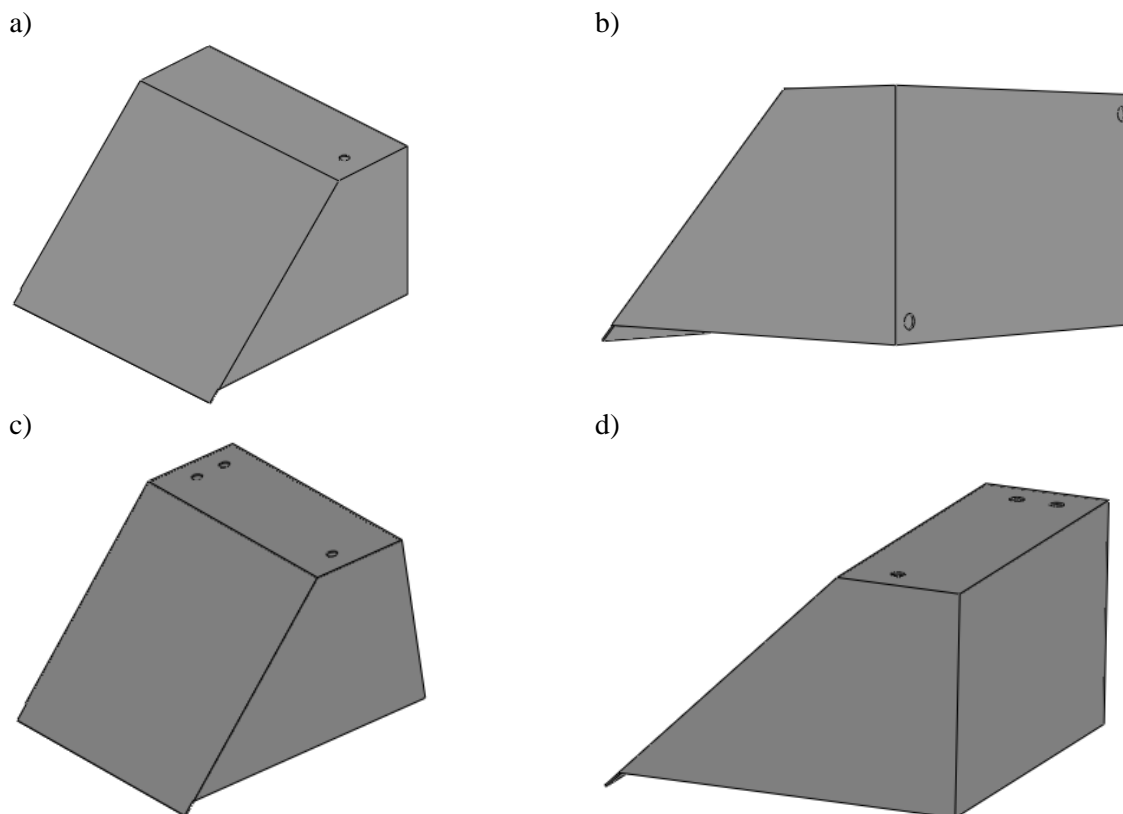


Figura 2.3 – Representação do tanque de: a) e b) Protótipos 1 e 2; c) e d) Protótipo3.

#### 2.2.4 Isolamento

Na escolha de um material para isolamento a propriedade mais relevante é à condutividade térmica que apresenta. Tendo em conta esta propriedade o material escolhido foi o poliestireno expandido de alta densidade, EPS, vulgarmente conhecido por esferovite. O EPS, em formato de placas, é amplamente utilizado devido à sua simplicidade de tecnologia de fabrico aliada a baixos custos de produção [52].

A capacidade de isolamento térmico apresentada pelo EPS deve-se sobretudo à sua estrutura celular fechada [53] constituída essencialmente por 2% de poliestireno e no seu interior por 98% de ar em repouso. O seu valor de condutividade térmica é dependente da densidade uma vez que diminui juntamente com o aumento de densidade do EPS [52]. As densidades das placas de EPS disponíveis pelo fabricante [54] variam entre os 12 a 35 Kg.m<sup>-3</sup> tendo sido adquirido EPS200 com densidade 30 Kg.m<sup>-3</sup> e condutividade térmica 0.033 W.m<sup>-1</sup>.°C<sup>-1</sup>.

Na presença de água, por exemplo chuva, o EPS absorve apenas quantidades mínimas oscilando entre 1% e 5% em volume. Devido às paredes das células serem impermeáveis a água aloja-se apenas nos poucos espaços existentes entre as células e esta seca rapidamente sem que se altere as propriedades do material. O EPS quando exposto a baixas temperaturas não sofre alteração, porém quando exposto a elevadas temperaturas as suas propriedades são afetadas, ocorrendo uma

diminuição na sua capacidade de isolamento. Para uma utilização segura é necessário que não esteja exposto de forma prolongada a temperaturas superiores a 100 °C [54].

O isolamento, com espessura de 30 mm, representado na figura 2.4, foi projetado de modo a isolar toda a parte de trás do absorvedor e isolar o tanque em toda a volta exceto na sua frente.

Apesar do isolamento mais empregue nos painéis termossifão tradicionais à venda mercado ser o poliuretano, devido à sua reduzida condutividade térmica, optou-se pela utilização de poliestireno expandido porque como mencionado é vendido em placas representando um menor custo. Para utilização de poliuretano seria necessário fazer um molde para inserir no seu interior as substâncias que em contacto dão origem ao isolamento na forma que se pretende o que corresponderia a maiores custos. Deste modo para os protótipos optou-se pela solução mais económica.

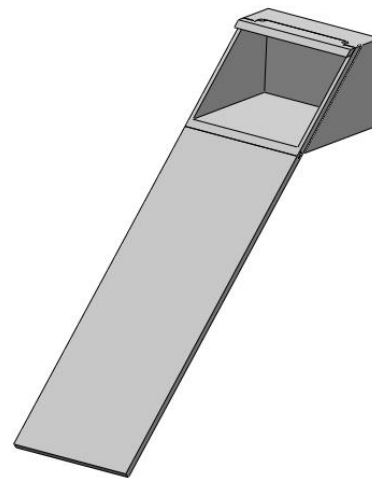


Figura 2.4 – Representação do isolamento.

### 2.2.5 Permutador

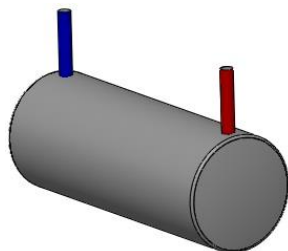
O material escolhido para o permutador foi aço inoxidável, do tipo 316L, e não um material polimérico porque no sistema termossifão com permutador pretende-se que a permuta de calor entre o fluido que circula no absorvedor e a água contida no permutador seja rápida e eficiente. Os materiais metálicos devido à sua natureza de elevado valor de condutividade térmica comparativamente a materiais poliméricos tornam-se os mais apropriados para esta função.

O aço inoxidável é uma liga metálica constituída essencialmente por ferro e cromo tendo por vezes presentes outros elementos como por exemplo níquel. As suas propriedades de maior interesse são elevada resistência à corrosão e durabilidade. A elevada resistência à corrosão deve-se à presença de cromo que forma um filme de óxido estável na superfície protegendo o aço de agentes oxidantes [55].

O permutador de calor foi projetado em forma cilíndrica e a sua utilização é na horizontal. Na figura 2.5 é representado a azul e vermelho a entrada e saída de água respetivamente. Na figura 2.5 b) é visível que a entrada de água fria é feita por um canal que vai quase até ao fundo do permutador e o canal de saída de água quente encontra-se no topo de forma a maximizar a eficiência do processo fazendo uso da estratificação.

O permutador apresenta uma capacidade máxima de 17 litros.

a)



b)

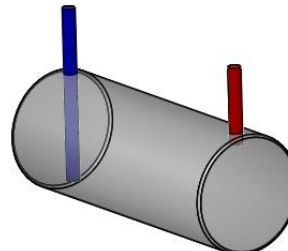


Figura 2.5 – Representação do permutador.

### 2.2.6 Suporte

Na escolha do material para servir de suporte ao coletor optou-se por usar um material metálico em vez de polimérico dado que é o mais indicado para suportar o seu peso elevado devido à água

que irá estar contida dentro dele. Escolheu-se então utilizar suportes em ferro galvanizado. A galvanização é um processo em que se reveste a superfície do ferro com uma camada de zinco que proporciona um efeito de barreira evitando o fenômeno de oxidação do ferro conhecido habitualmente por ferrugem. Também se poderia ter optado pela utilização de suportes em inox mas devido ao elevado custo associado em comparação com os de ferro galvanizado não se considerou essa hipótese.

### 2.2.7 Representação dos protótipos

A configuração final de cada protótipo é apresentada nas figuras seguintes. Na figura 2.6 a) e b) são apresentados os protótipos 1 e 2 respetivamente em que é visível que a única diferença entre ambos se refere à ausência de cobertura transparente no protótipo 1. Na figura 2.6 c) e d) é apresentado o protótipo 3 e na figura 2.6 d) não é visível a cobertura transparente, o absorvedor nem a parte da frente do tanque para que seja visível de que forma o permutador se encontra colocado dentro do tanque. Os três protótipos apresentam uma inclinação de 45°.

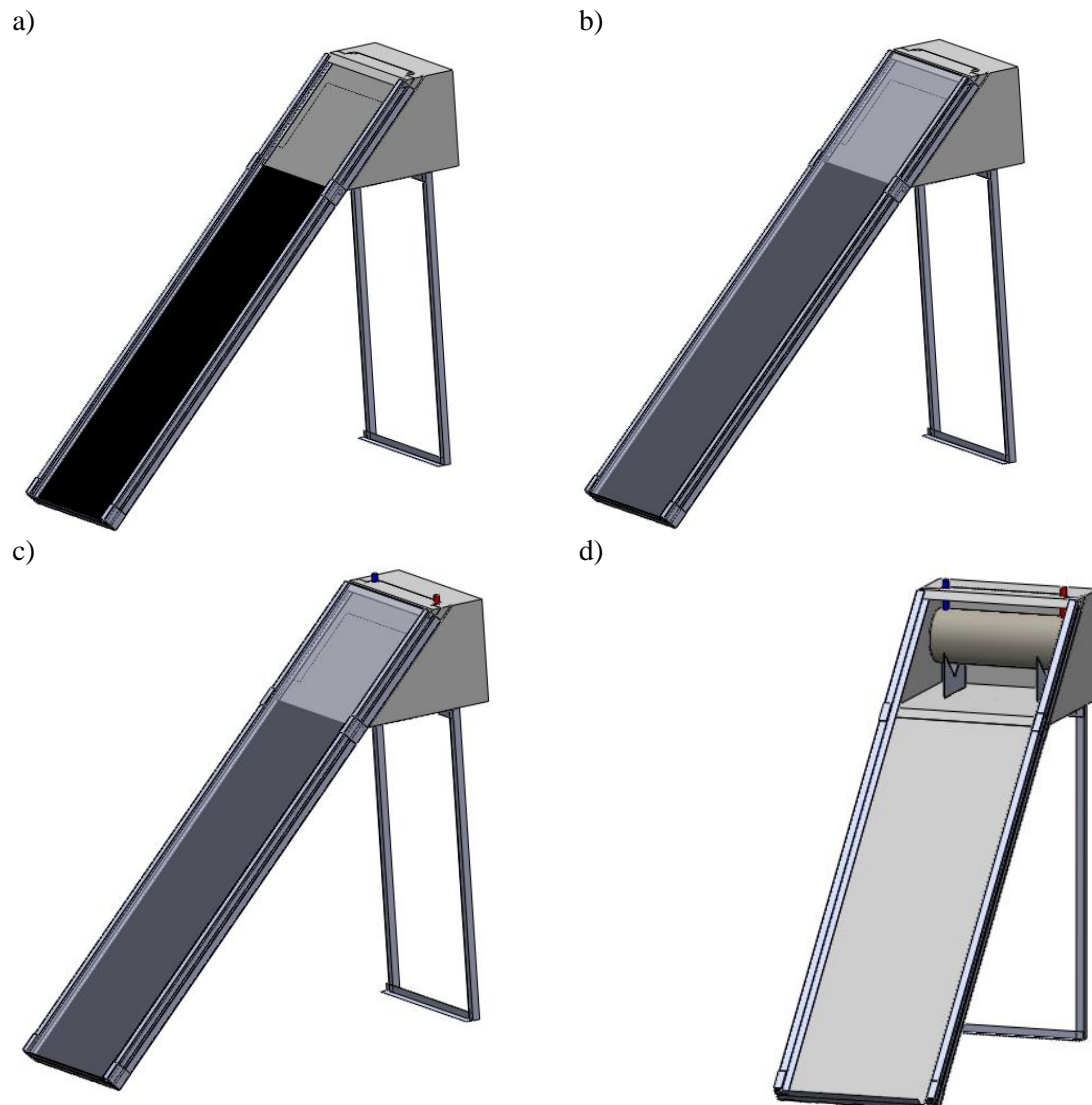


Figura 2.6 – Representação dos protótipos.

Dada a configuração dos protótipos os protótipos 1 e 2 são classificados como sistemas de circulação direta pois não utilizam permutador e deste modo a água que circula nos coletores é a água



que posteriormente será utilizada para consumo. A água ao aquecer no absorvedor sobe até ao seu topo e desse modo é libertada próxima do topo do tanque. Por sua vez, a água fria contida no tanque ou que entra quando há um consumo, através da furação descrita na figura 2.3 b), entra no absorvedor através das suas laterais. Na figura 2.7 é de novo apresentada a configuração do protótipo 1 mas sem a parte da frente do tanque para que seja visível o absorvedor por forma a perceber como ocorre a circulação da água.

Por outro lado, o protótipo 3 é classificado como sistema de circulação indireta devido ao uso de permutador. No capítulo 1 foi feita referência aos permutadores em que nalguns casos no seu interior circula a água de consumo e noutros não. No protótipo proposto o permutador contém a água de consumo e, a água contida no tanque é a que circula nos coletores. Assim, o permutador encontra-se imerso no interior do tanque para que ocorra transferência de calor da água contida no tanque com a água de consumo contida no permutador. A circulação de água entre o absorvedor e o tanque ocorre da mesma forma que foi descrita para os protótipos 1 e 2.

A área de abertura de cada protótipo, ou seja, a área sobre a qual incide radiação no absorvedor tem o valor de  $0.94 \text{ m}^2$ .

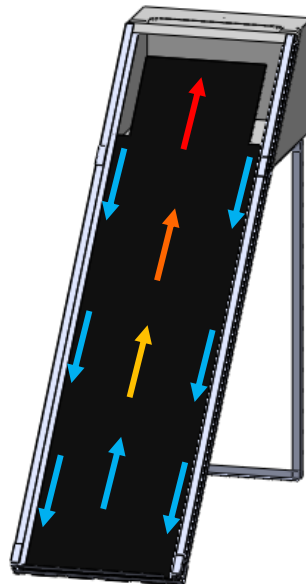


Figura 2.7 – Representação do protótipo 1 com indicação de circulação de água no circuito permutador - tanque.

### 3. CONSTRUÇÃO, MONTAGEM E MONITORIZAÇÃO DOS PROTÓTIPOS

---

#### 3.1 Descrição dos acessórios

Na figura 3.1 são apresentadas imagens de alguns dos acessórios utilizados na construção, montagem e estudo dos protótipos seguido duma breve explicação da sua aplicação e funcionamento.

a)



b)



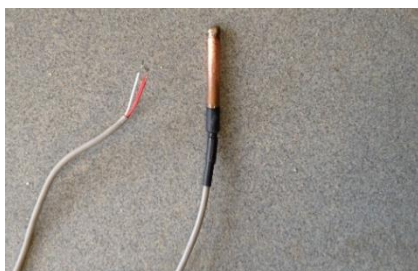
c)



d)



e)



f)



g)



h)





Figura 3.1 - a) Soprador de ar quente; b) Válvula misturadora; c) Caudalímetro; d) Eletroválvula; e) Sonda de temperatura; f) Bainhas; g) Caixa estanque; h) Piranómetro; i) Válvula passador manual; j) Válvula anti-retorno.

### Soprador de ar quente

O soprador de ar quente é um acessório utilizado para soldar, através de aquecimento, diversos tipos de materiais permitindo a regulação de temperatura na gama 80 a 630 °C. Para a sua utilização é necessário direcionar o ar quente para a zona a unir para que em simultâneo ocorra preparação térmica do substrato a ser colado seguido da fusão do fio utilizado como união. Na figura 3.1 a) pode-se visualizar um fio próprio que é utilizado na soldagem de PP inserido na entrada bocal do soprador.

### Válvula misturadora termostática

A válvula misturadora tem como função a mistura da água quente à saída do permutador com a água fria da rede assegurando o fornecimento de água para consumo a uma temperatura regulada. A sua utilização além de possibilitar uma utilização eficiente de água quente permite também a prevenção de possíveis queimaduras.

### Caudalímetro

O caudalímetro é um instrumento de medição de caudal de um fluido. O instrumento utilizado além de medir caudal também permite a medição de temperatura.

Os dados obtidos são em tensão e a sua conversão para caudal e temperatura é feita através de equações que relacionam estas variáveis, próprias para cada instrumento, dados pelo fabricante. Para este caso em concreto o caudalímetro usado foi o modelo VFS 2-40 L da marca Resol. Neste, a conversão da tensão medida em caudal e temperatura é, de acordo com o fabricante, realizada usando as seguintes funções:

$$V_1 = 0.077 x_1 + 0.433 \quad (3.1)$$

onde  $V_1$  representa a tensão e  $x_1$  o caudal em litros por minuto.

$$V_2 = 0.03 x_2 + 0.03 \quad (3.2)$$

onde  $V_2$  representa a tensão e  $x_2$  a temperatura em °C.

Para que o caudalímetro entre em funcionamento, segundo dados do fabricante, é necessário que lhe seja aplicado uma tensão no valor de 5 V.

### Eletroválvula

Eletroválvula é um instrumento concebido para controlar o fluxo de um fluido que passa através de um canal. A eletroválvula utilizada encontra-se normalmente fechada e segundo dados do fabricante apenas entra em funcionamento, ou seja, abre quando lhe é aplicada uma tensão de 24 V DC e torna a fechar quando é interrompida a tensão que lhe é aplicada.

### Sonda de temperatura

Os sensores de temperatura podem ser classificados em três grupos, nomeadamente, os sensores resistivos, os termoeletrônicos e os de infravermelhos. Os sensores resistivos, por exemplo, são ainda subdivididos em termístores e em RTD (do inglês, *Resistance Temperature Detector*). Os sensores RTD baseiam-se em elementos sensores metálicos, como por exemplo platina, cobre ou níquel, cuja resistência aumenta, aproximadamente linear, com o aumento de temperatura [56].

De entre os vários tipos de sensores de temperatura existentes optou-se pela utilização dos RTDs de platina em que à temperatura de 0 °C apresentam uma resistência de 1000 Ω sendo vulgarmente conhecidos por PT1000. A resistência dum sensor RTD de platina aumenta a uma taxa de aproximadamente 0.3679 % [57] por cada aumento de grau celsius e, portanto no caso de PT1000 esse valor é de 3.679 Ω. Dado que o seu comportamento não é totalmente linear pode se recorrer a equações que permitem uma melhor aproximação, como por exemplo, a equação a seguir descrita onde  $R_0$  representa o valor da resistência a 0 °C,  $T$  a temperatura e  $R$  a resistência [57]:

$$R = R_0(1 + 39.08 * 10^{-4} T - 5.8 * 10^{-7} T^2) \quad (3.3)$$

Todas as sondas de temperatura foram construídas manualmente. Para a construção de cada sonda utilizou-se uma resistência PT1000, um cabo condutor, uma bainha, pasta térmica e manga retrátil. O cabo condutor é constituído por dois fios em que cada fio foi soldado e envolvido com manga retrátil para que não houvesse contacto entre ambos. Posteriormente este conjunto, resistência e cabo condutor, foi colocado dentro de uma bainha e o seu interior foi preenchido com pasta térmica. Caso não fosse colocado pasta térmica no interior da bainha, iria apenas existir ar dentro desta e, como sabido, o ar é mau condutor térmico. Desta forma, a utilização de pasta térmica minimiza a diferença de temperatura entre o interior da bainha e o local onde se pretende fazer uma medição obtendo leituras fiáveis. Por fim, envolveu-se com manga retrátil a junção entre a bainha e o cabo condutor, como se pode visualizar na figura 3.1 e).

### **Bainha**

As bainhas apresentadas na figura 3.1 f) são em cobre e servem para inserção das sondas de temperatura. Desta forma oferecem proteção e consequentemente maior durabilidade às sondas garantindo que não estão em contacto direto com o fluido sobre o qual se pretende medir a temperatura. A escolha do cobre deve-se a ser um metal com elevada condutividade térmica o que permitirá uma leitura das sondas em tempo real fiável.

### **Caixa estanque**

A caixa estanque é utilizada para proteger ligações elétricas que se encontrem no exterior de agentes atmosféricos que possam interferir com o seu bom funcionamento como, por exemplo, humidade ou chuva.

### **Piranómetro**

O piranómetro é um dispositivo que mede a irradiância solar global numa superfície plana (num campo de visão de 180°), sendo a sua unidade de medida W/m<sup>2</sup>. O piranómetro utilizado é baseado numa termopilha, composta por vários termopares ligados entre si, revestida com uma superfície negra que absorve a radiação criando uma diferença de temperatura entre o centro da termopilha (junção quente) e o corpo do piranómetro (junção fria) [58]. De acordo com o efeito de Seebeck a diferença de temperatura, entre as duas junções, irá gerar uma tensão elétrica proporcional à variação de temperatura. O piranómetro usado foi um LP PYRA 03.

### **Válvula passador manual**

A válvula passador, também denominada válvula de corte, é uma válvula que permite a passagem ou interrupção de um fluido de forma manual conferindo a possibilidade de corte de passagem de fluido durante uma intervenção de reparação do sistema.

### **Válvula anti-retorno**

A válvula anti-retorno, tal como o nome sugere, permite a passagem de fluido num único sentido impedindo a sua circulação no sentido oposto pelo que, a direção de fluxo permitida é indicada na válvula. O seu funcionamento num único sentido deve-se a possuir uma membrana no seu interior que abre quando um fluido exerce pressão, no sentido permitido, e após o fluido passar essa

membrana e deixar de existir pressão a membrana fecha e deste modo não abre caso o fluido exerça pressão no sentido oposto.

### 3.2 Esquema de montagem de acessórios

Na figura 3.2 é apresentado o esquema de montagem com indicação dos acessórios necessários para o estudo dos protótipos.

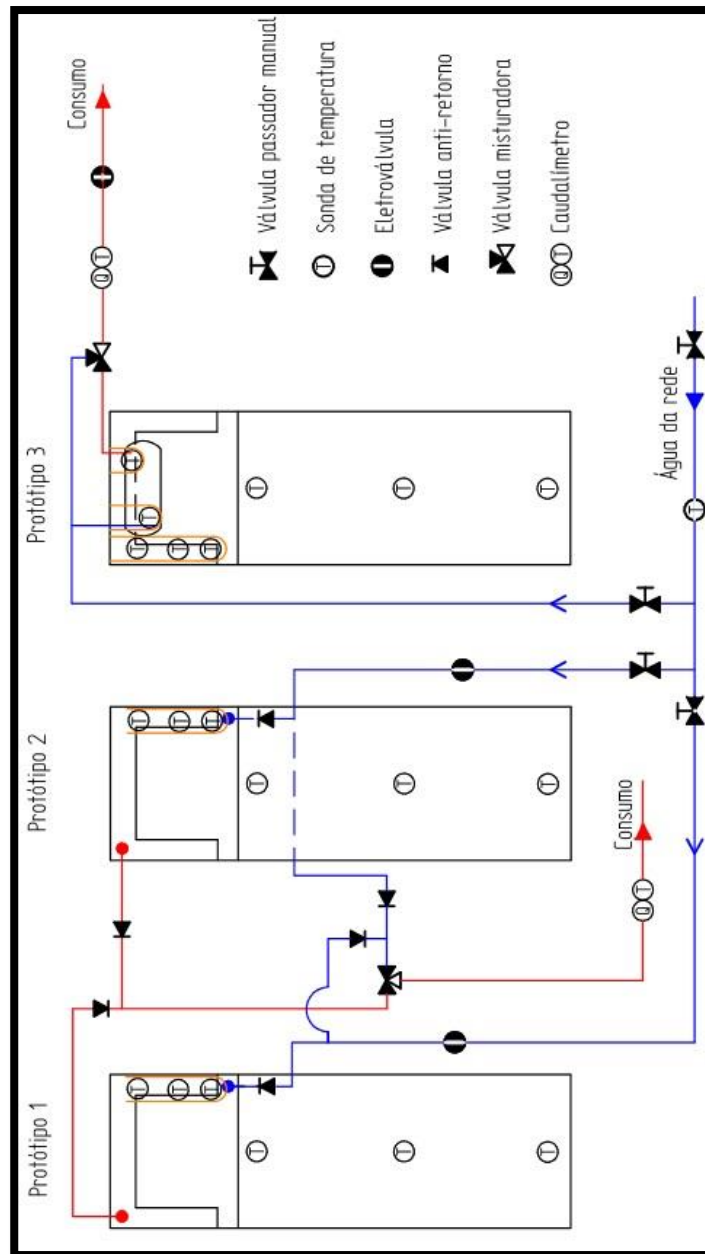


Figura 3.2 – Diagrama esquemático.

Para se efetuar o estudo dos protótipos foram utilizados os acessórios descritos anteriormente da seguinte forma:

- Sondas de temperatura: nos três protótipos foram colocadas três sondas em cada tanque e absorvedor para se conhecer a temperatura nesses locais e analisar fenômenos como a estratificação e, uma sonda na entrada de água da rede. Dado que o protótipo 3 tem permutador foram inseridas duas

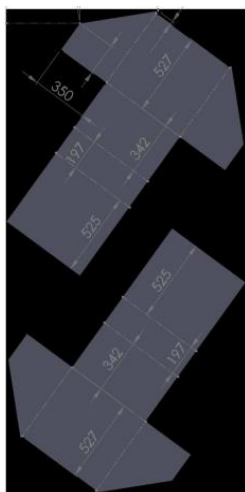
- Válvulas passador manual: foi colocada uma válvula junto à entrada da água da rede, e uma antes de cada entrada de água para os protótipos. Desta forma, quando era necessário, por exemplo, reparar algum problema num dos protótipos facilmente se efetuava a interrupção de circulação de água da rede;

- Válvula anti-retorno: nos protótipos 1 e 2 foi colocada uma válvula anti-retorno junto às entradas de água fria dos respectivos tanques assegurando que a água contida no tanque em momento algum flui em sentido oposto. Nalguns consumos poderá ser necessário água fria caso a água quente exceda a temperatura máxima regulada manualmente pela válvula misturadora e como a água contida no fundo do tanque é mais densa poderia inverter o seu fluxo e descer através das tubagens até à entrada de água fria na válvula misturadora. O protótipo 3 não necessita de válvula anti-retorno porque como a água é inserida pelo topo do permutador não há risco de inversão de fluxo do fluido.

- Caudalímetro: os protótipos 1 e 2 partilham o mesmo caudalímetro pelo mesmo motivo anteriormente descrito para a válvula misturadora. Ambos os caudalímetros foram colocados a seguir às válvulas misturadoras permitindo conhecer a temperatura e caudal da água durante um teste de consumo.

### 3.3.1 Protótipo 1

a)



A large, light brown cardboard cross is positioned against a white wall. The cross is made of several pieces of cardboard, with a central vertical piece and two horizontal pieces forming the arms. The top of the cross is slightly wider than the arms, creating a trapezoidal shape at the top. The cross is standing upright on a wooden floor.

24



Para montagem do primeiro tanque foi efetuada uma dobragem a quente com auxílio de um maçarico (figura 3.4) e de seguida soldou-se com o soprador de ar quente nas zonas de corte de forma a uni-las e assim obter-se o tanque montado. Porém, este método revelou dificuldades durante o processo de soldagem e também não permitia soldar nenhuma zona por dentro nem posteriormente soldar o absorsor ao tanque pela sua parte interior.

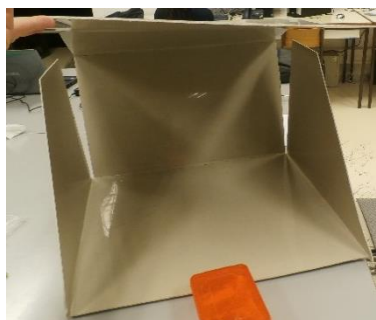


Figura 3.4 - Tanque após processo de dobragem a quente.

Após a soldagem também se verificou que a ranhura onde é inserido o absorsor apresentava um espaçamento superior ao pretendido (figura 3.5) o que iria dificultar a soldagem do absorsor ao tanque. Devido a isto optou-se por não se utilizar este tanque para um protótipo.



Figura 3.5 - Ranhura do tanque onde é encaixado o absorsor.

Como o 1º método descrito anteriormente, dobragem seguido de soldagem, revelou problemas optou-se na construção do tanque seguinte cortar a placa PP em várias peças e não como uma única peça de modo a que a sua união seja apenas efetuada através de soldagem eliminando assim o processo de dobragem.

O 2º método, apenas usando processo de soldagem, requer uma maior quantidade de tempo na sua preparação (mão de obra) e maior quantidade de solda devido a termos mais zonas para soldar. Todavia, este método além de facilitar a montagem e ser possível soldar por dentro também permite um melhor aproveitamento das placas PP. No 1º método com uma placa apenas se consegue obter dois tanques devido à sua forma de peça única. Com o 2º método é possível com apenas uma placa PP obter-se material para quase quatro tanques pois o tanque é subdividido em várias peças não havendo desta forma desperdício de material.

Após a soldagem, interior e exteriormente, das componentes laterais, base e parte de trás foram efetuados testes para verificar se existiam fugas. Para tal apenas encheu-se o tanque com água e, geralmente existiam fugas nos cantos. Como nesta etapa a peça da frente do tanque ainda não estava soldada permitiu reforçar a solda nos cantos não só por fora, mas também por dentro. Quando já não se verificava nenhuma fuga procedia-se à soldagem da parte da frente ao tanque. Nalgumas zonas foi possível soldar interiormente diminuindo a possibilidade de fugas. O topo do tanque foi apenas soldado após colocação do absorsor e permutador.

Para a construção do isolamento cortou-se a placa EPS em diferentes peças com uma faca e, de seguida foram unidas através do uso de uma cola própria para a colagem de poliestireno expandido. Após a colagem foi deixado durante um dia em repouso para uma secagem eficaz. Na figura 3.6 são apresentadas imagens do isolamento montado com as calhas laterais e suportes.

Uma parte do absorsor foi introduzida dentro do tanque através da ranhura deste. Antes de se iniciar a soldagem colocou-se o absorsor e o tanque dentro do conjunto isolamento e suportes (ver figura 3.6) de modo a o absorsor ficar colocado na posição correta. Após a identificação das zonas

concretas a soldar retirou-se o tanque e absorSOR dentro do conjunto mencionado e procedeu-se à sua união. Como nesta etapa o topo do tanque ainda não estava soldado foi possível soldar o absorSOR ao tanque, pela parte interior do tanque, nas zonas laterais e nalgumas junto à ranhura.



Figura 3.6 - Imagens do isolamento e suportes do protótipo.

Depois de soldar o absorSOR ao tanque foram realizados de novo testes para verificar se existiam fugas enchendo o tanque com água. As fugas verificaram-se sobretudo nos cantos de junção do absorSOR e tanque e como inicialmente para tapar uma dada fuga não se esvaziava o tanque surgiam ainda mais fugas, pois a água tende a escapar-se pelas zonas mais frágeis. Então nos testes seguintes optou-se por esvaziar sempre o tanque após a identificação de uma fuga. Dado que esta zona se revelou muito propícia a fugas, também devido a não poder ser soldada por dentro, foi deixado este conjunto durante uma noite cheio de água de forma a verificar a existência de fugas. Todo este processo repetiu-se até não existir nenhuma fuga. Na figura 3.7 a) é mostrado imagens do conjunto tanque e absorSOR onde é visível a imensa quantidade de solda utilizada nos cantos.

O absorSOR apresentou algumas fugas na sua parte inferior e, portanto, soldou-se ao longo de toda essa zona, à frente e atrás, mostrado na figura 3.7 b). Tal deveu-se a defeito do próprio material.

a)



b)



Figura 3.7 – a) Imagem de canto de conjunto tanque e absorSOR; b) Parte inferior de absorSOR.

Antes de se efetuar a montagem do protótipo foram colocadas as tubagens, de acordo com o mencionado na figura 3.2, referentes à entrada de água fria e saída de água quente do tanque. Para tal foram feitas duas furações na parte de trás do tanque, como mencionado no Capítulo 2, e as tubagens foram colocadas nesse local e soldadas. De seguida foram realizados testes para verificar a existência de alguma fuga. Identificou-se uma fuga na zona onde a tubagem de água fria foi soldada no tanque. A colocação das tubagens foi feita já com o tanque montado, apenas sem o topo, sendo somente possível soldar por dentro a tubagem de água quente pois é a que se encontrava mais próxima do topo e como a tubagem de água fria foi apenas soldada por fora tornou esta zona muito



suscetível a fugas. Após a eliminação da fuga encheu-se o tanque e verificou-se de novo uma fuga na mesma zona e somente após três repetições deste processo foi possível não se ter mais fugas.

Posteriormente, foi soldado o topo do tanque e montado todo o protótipo, colocação das sondas de temperatura e restantes acessórios necessários, como mencionados na figura 3.2. As sondas de temperatura para medição no absorvor foram inseridas, cada uma, num pedaço de material absorvor que se uniu ao absorvor através de cola araldite e utilizou-se pasta térmica para que a transferência de calor entre ambos seja rápida e assim as medições de temperatura sejam mais precisas.

Na figura 3.8 a) é mostrado as tubagens colocadas na parte de trás do tanque e na figura 3.8 b) as três sondas de temperatura colocadas, como anteriormente descrito, no absorvor.

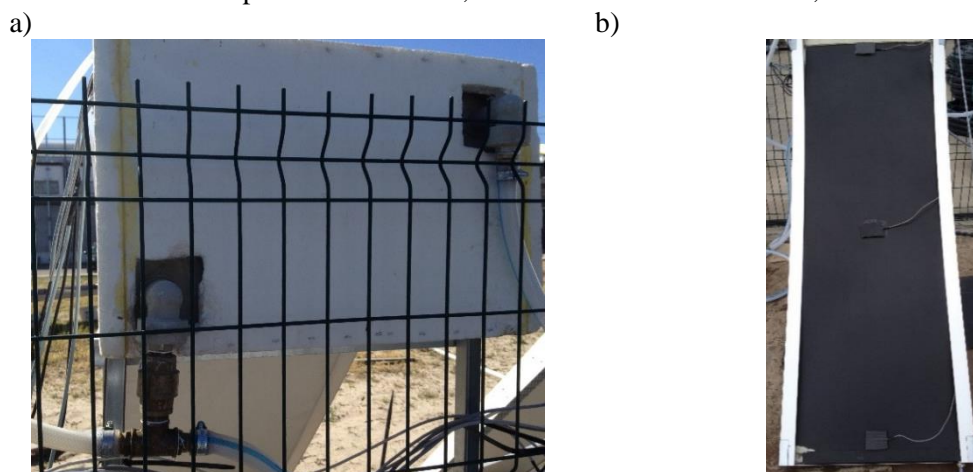


Figura 3.8 – a) Tubagens de água fria e quente no tanque; b) Sondas de temperatura unidas ao absorvor.

O enchimento com água foi feito através da furação existente no topo do tanque onde se coloca a bainha que contém as sondas de temperatura.

O protótipo foi fixado no chão, na empresa J.Prior, junto a uma rede para que permitisse a sua união através de braçadeiras por forma a estar seguro no caso de ocorrência de vento. Os protótipos 2 e 3 também foram colocados nesse local com inclinação de 45° em relação à vertical e virados para Sul para que deste modo recebessem o máximo de radiação incidente.

### 3.3.2 Protótipo 2

Devido às fugas verificadas no protótipo 1 na zona onde se soldou as tubagens ao tanque optou-se por no protótipo 2 não seguir esse método. Neste protótipo foram utilizados casquilhos e oringues para as tubagens eliminando a necessidade de soldagem, mostrado na figura 3.9.

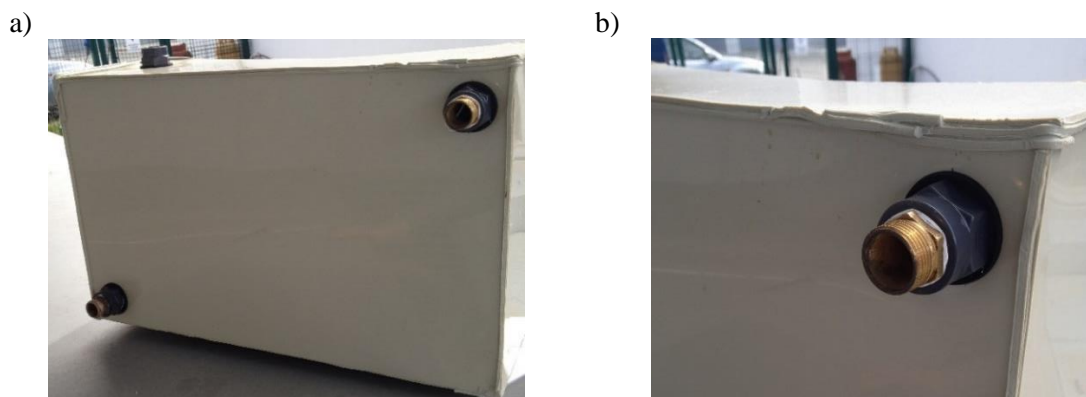


Figura 3.9 – Imagens após colocação de casquilhos e oringues nas entradas de água fria e quente no tanque.

Com a colocação destes acessórios não se detetou nenhuma fuga quando se encheu o tanque revelando-se assim uma boa solução. As restantes etapas para montagem do protótipo e enchimento foram as mesmas que realizadas para o protótipo 1.

### 3.3.3 Protótipo 3

A construção e montagem do tanque, absorvedor e isolamento seguiu os mesmos procedimentos descritos para os protótipos 1 e 2. Após estas etapas procedeu-se à colocação do permutador dentro do tanque e soldagem do topo. Em primeiro colocou-se silicone na zona dos furos do topo do tanque para o unir ao permutador e deixou-se durante um dia a secar. No dia seguinte ainda não havia aderido o permutador ao topo eliminado esta hipótese. Uma outra forma de segurar o permutador dentro do tanque seria a de utilizar um suporte metálico. Como não é possível soldar uma peça metálica ao material PP seria necessário um suporte metálico que se mantivesse firme e estável dentro do tanque, mas devido ao elevado preço associado não se avançou com esta hipótese. Optou-se então por fazer um suporte em PP e deste modo foi possível solda-lo à base do tanque, mostrado na figura 3.10, com um custo muito inferior ao que seria esperado se fosse utilizado um suporte metálico.



Figura 3.10 - Suporte soldado dentro do tanque.

A seguir efetuou-se montagem do protótipo e procedeu-se à colocação das tubagens, sondas de temperatura e restantes componentes necessários à monitorização do sistema, tal como mencionado na figura 3.2. Nas figuras 3.11 a) e b) são apresentadas imagens do protótipo 3 onde é visível por exemplo a válvula misturadora, o local onde foi colocada a bainha que contém as sondas de temperatura para o tanque e a mangueira utilizada para circulação de água.

a)



b)

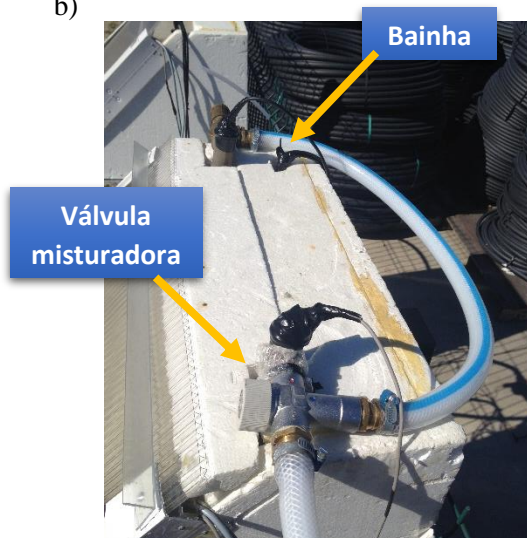


Figura 3.11 - Protótipo 3: a) Imagem frontal; b) Topo.

Dado que este protótipo tem permutador significa que possui dois circuitos de água, um onde circula a água entre o absorvor e o tanque e outro referente à água contida no permutador. Em relação ao primeiro circuito referido existem duas formas do encher, uma delas é através de um tubo, utilizado para saber qual o nível de água no tanque (figura 3.12), e a outra através da furação existente no topo do tanque onde é colocada a bainha que contém no seu interior as sondas de temperatura. Como o tubo mencionado tem um diâmetro muito pequeno tornaria o processo de enchimento bastante demorado, portanto optou-se encher este circuito pela furação. Por outro lado, o permutador foi enchido através do processo normal para os sistemas termossifão, ou seja, entrada de água da rede na entrada de água fria do permutador. A configuração deste protótipo permitia a adição de anticongelante no circuito absorvor tanque, mas não se o fez e apenas utilizou água como fluido de circulação.

Durante o enchimento do absorvor e tanque verificou-se a existência de uma fissura no fundo do tanque tendo sido necessário desmontar todo o sistema, mostrado na figura 3.11 b). Uma vez que o conjunto isolamento, suportes, tanque, absorvor e permutador, foram transportados já no seu formato de protótipo, da empresa Prírev para a empresa J.prior, associou-se a fuga a algum impacto ocorrido durante o transporte. Após eliminação da fissura, situada no fundo do tanque, com solda montou-se de novo o sistema e encheu-se com água não se verificando mais nenhuma fuga.

Nos três protótipos foi colocado um tubo numa furação existente na parte inferior do absorvor, mostrado na figura 3.12, que vai até ao topo dos protótipos para se conhecer o nível de água em cada tanque. Para colocação do tubo, em cada protótipo, foi colocado teflon em torno da furação do absorvor, colocado o tubo e uma abraçadeira de metal. Este local apresentou diversas vezes, nos três protótipos, fugas em que nalguns casos resultou mesmo no esvaziamento quase total dos coletores.

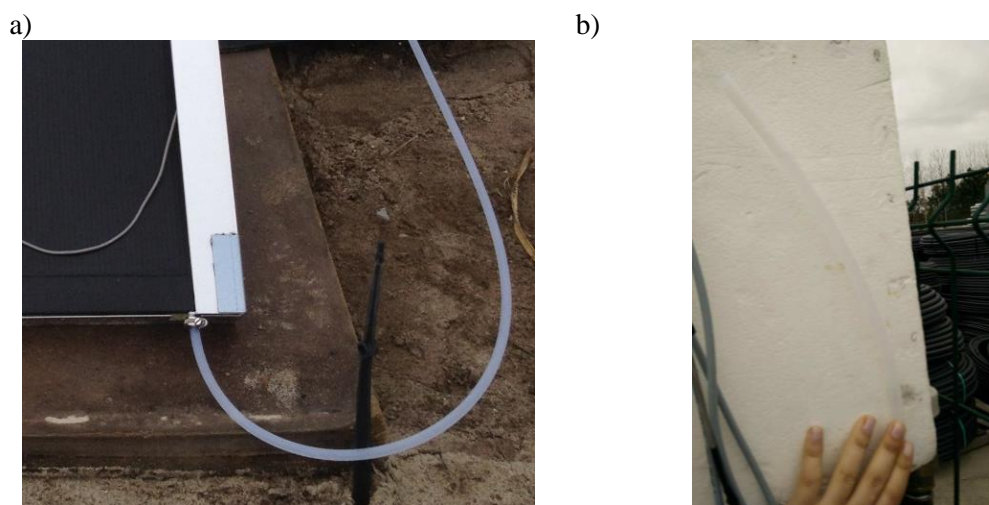


Figura 3.12 – Tubo de indicação nível de água.

### 3.4 Comportamento dos protótipos antes de monitorização

Durante o mês de Janeiro, devido às condições climáticas, foi possível submeter os protótipos a temperaturas negativas por forma a saber qual o impacto. Durante esta etapa ainda não se estava a realizar aquisição de dados. De acordo com dados recolhidos por equipamentos da empresa J.Prior no mês de Janeiro durante a noite e início da manhã as temperaturas mínimas registadas foram negativas e durante o dia atingiam em média 15 °C, sempre com céu limpo, não havendo ocorrência de chuva.

No primeiro teste, realizado durante alguns dias, os protótipos estiveram cheios de água expostos a temperaturas negativas durante o período nocturno. Durante estes dias constatou-se que a água contida nos painéis solidificou todas as noites e só nas manhãs seguintes, devido à exposição

à radiação solar, passava completamente do estado sólido novamente a líquido. A água ao passar do estado líquido ao sólido aumenta de volume o que poderia causar algum dano ou mesmo rebentamento, por exemplo no absorsor ou nas tubagens, contudo tal não se verificou. Ainda assim, apesar de não se ter originado nenhum dano, este teste revelou que em dias muito frios ocorrem elevadas perdas térmicas sendo necessário melhorar os protótipos a nível de isolamento de forma a minimizá-las.

O segundo teste consistiu em deixar os protótipos sem água durante quatro dias expostos a radiação solar. Ao fim desse tempo verificou-se que todos os materiais não sofreram qualquer tipo de alteração excepto as placas de isolamento que estão em contacto com o absorsor. Devido à radiação solar a que os protótipos estiverem expostos durante o período diurno e pelo fato de os absorsores não conterem água provocou um elevado aumento de temperatura nesta zona causando a deterioração das placas de isolamento em toda a zona de contacto, como se pode visualizar na figura 3.12. Segundo as especificações do isolamento utilizado, EPS200, a temperatura máxima a que podem estar sujeitos sem sofrer qualquer deformação é de 85 °C . Como nesta etapa ainda não se estavam a adquirir dados não se tem a certeza dos valores máximos de temperatura que os absorsores atingiram, no entanto, devido às especificações do isolamento as temperaturas atingidas ultrapassaram com certeza os 85 °C.



Figura 3.13 -Imagens do isolamento deteriorado.

Em consequência da degradação verificada nas placas de isolamento foi necessário substituí-las por placas novas e para tal não voltar a acontecer adicionou-se uma camada fina de lã de rocha entre o absorsor e a placa isoladora. A lã de rocha, figura 3.14, é um material isolador térmico que apesar de apresentar valores de condutividade térmica na mesma gama do que os exibidos por EPS possui uma temperatura máxima a que pode estar sujeito sem sofrer degradação muito superior. Porém, é necessário garantir que a lã de rocha não entra em contacto com água, por exemplo, em dias de chuva porque devido à sua estrutura iria absorvê-la perdendo dessa forma o seu efeito como isolante.



Figura 3.14 - Placa de lã de rocha.



### 3.5 Controlo e monitorização

#### 3.5.1 Sistema de aquisição de dados implementado

Após a montagem dos protótipos procedeu-se à ligação das sondas, eletroválvulas e caudalímetros à caixa estanque e desta saem dois cabos composto por 25 condutores cada que foram ligados a um multímetro, também denominado *data logger*, equipamento responsável pela aquisição de dados.

O sistema de aquisição de dados é composto por um multímetro digital Agilent 34970A, duas placas de aquisição Agilent 34970A, com vários canais onde se encontram ligados os cabos condutores, que são inseridas na entrada traseira do multímetro e por um computador. Para operar o sistema de aquisição de dados e efetuar controlo, nomeadamente das electroválvulas, foi implementado um programa, desenvolvido em LabVIEW. Na figura 3.5 é descrito esquematicamente através de imagens como foi realizada a ligação das sondas e restantes componentes ao sistema de aquisição de dados. Na figura 3.5 c), correspondente ao *data logger*, é visível o seu ecrã onde aparece a temperatura em tempo real, em °C, para um dado canal selecionado.

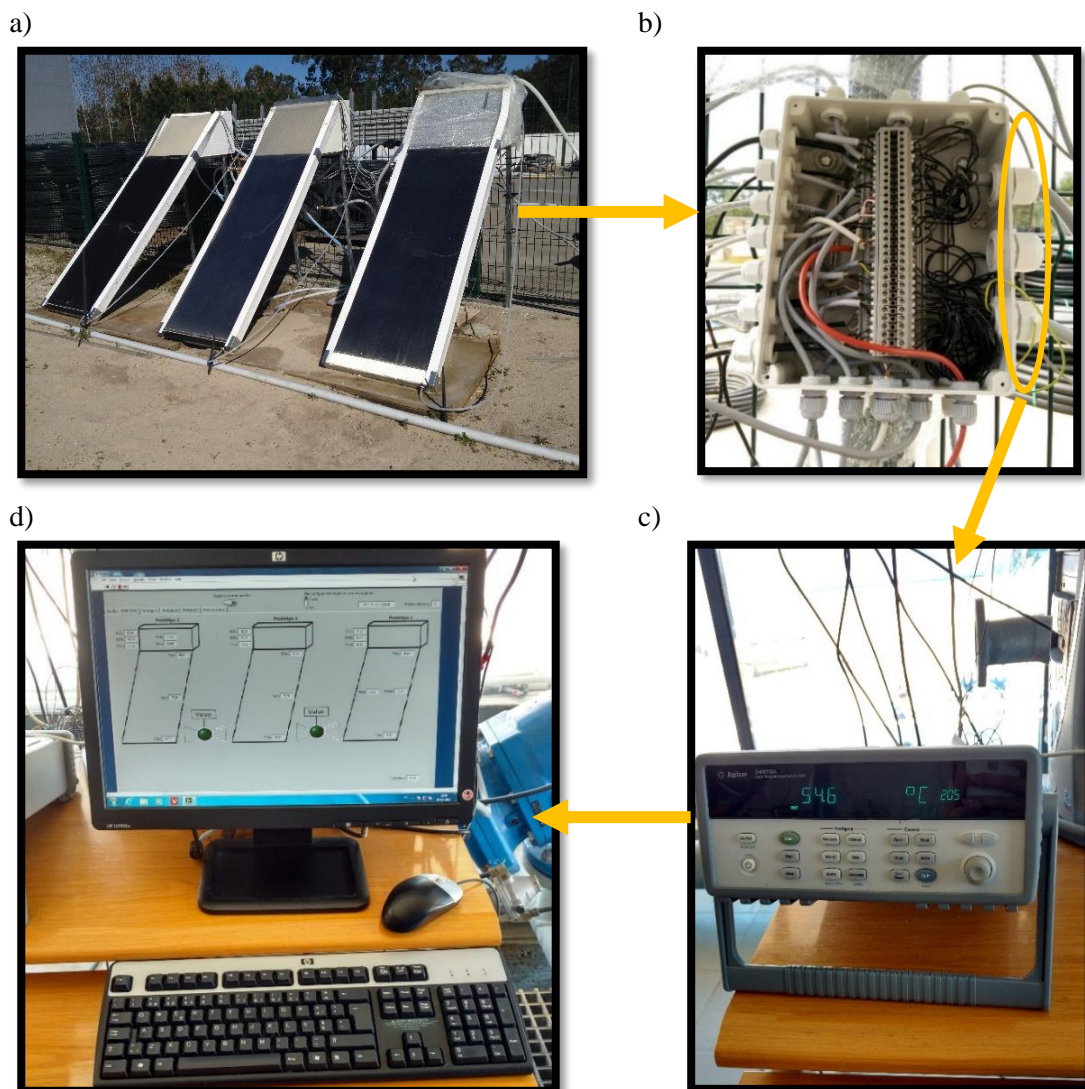


Figura 3.15 – Representação esquemática: a) Protótipos; b) Interior da caixa estanque; c) *Data logger*; d) Computador.

Na figura 3.16 é apresentada uma imagem do ambiente de trabalho do software, com identificação de vários locais importantes no controlo de todo o sistema.

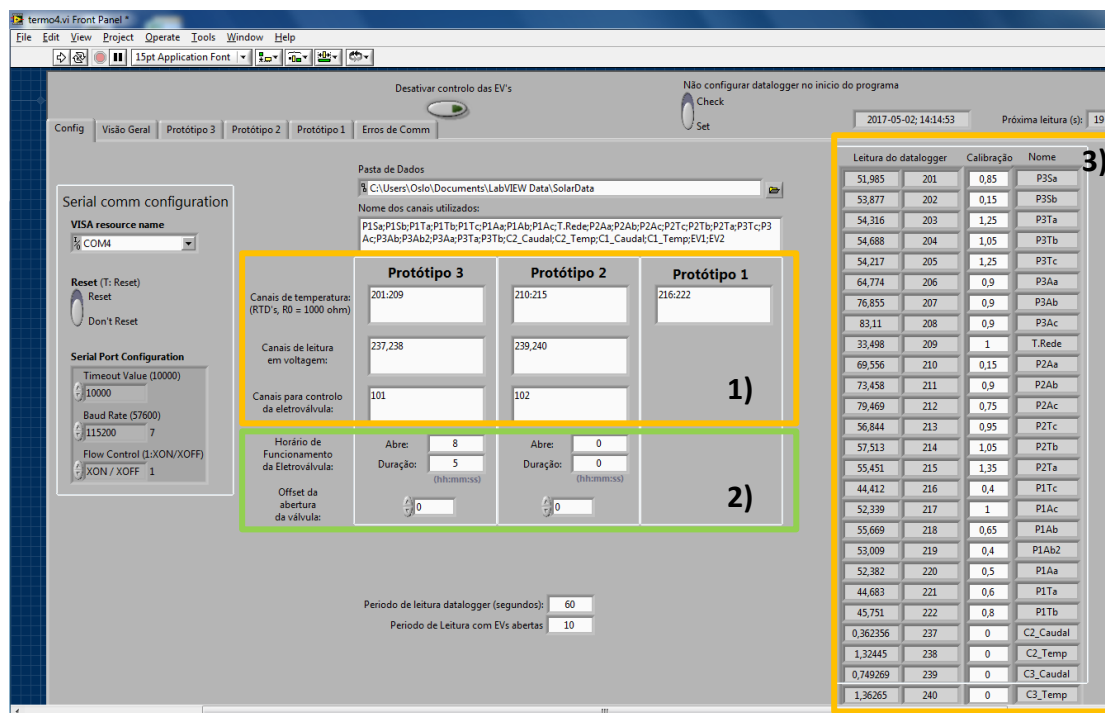


Figura 3.16 – Ambiente do software implementado.

A zona identificada por 1) refere-se à identificação dos canais das sondas de temperatura, caudalímetro e eletroválvula para cada protótipo. A zona 2) refere-se ao horário de funcionamento para cada eletroválvula e a indicação, em minutos, da sua duração aberta, ou seja, é nesta zona que se insere os horários a que se pretende realizar testes de consumo. Na imagem mostrada pode-se ver o exemplo de um consumo agendado para as 08:00 h com duração de 5 minutos que ocorrerá durante todos os dias enquanto não se o alterar, mas é importante referir que podem ser inseridos vários horários de uma única vez. A zona 3) refere-se às temperaturas lidas e valores de tensão, em tempo real, para cada canal, aos valores de calibração impostos a cada sonda de temperatura e o nome de identificação. O *data logger* utilizado já tem incorporado a função de conversão de resistência em temperatura para RTD's daí os dados obtidos já serem em temperatura e não resistência, contudo, não faz a conversão da tensão dos caudalímetros para caudal e temperatura.

Todas as sondas de temperatura foram calibradas sendo que para tal colocou-se cada sonda num recipiente que continha água e um termómetro digital. De seguida registou-se o valor lido pelo termómetro e o valor lido no *data logger* para o canal correspondente à sonda. A diferença entre o valor lido no *data logger* e o lido no termómetro digital corresponde ao valor que é introduzido no software (figura 3.6 zona 2, 3ª coluna).

Após calibração das sondas deu-se início à aquisição de dados. O software regista, para cada dia, os valores lidos num ficheiro em formato .txt de 60 em 60 segundos (valor inserido na zona 2) figura 3.16)) para os três protótipos. Além do ambiente de software mostrado na figura 3.16 o programa continha mais duas janelas. Numa delas a indicação, em tempo real, de todas as sondas de temperatura, ver figura 3.15 d), e os estados das eletroválvulas em que quando ocorria um consumo a eletroválvula que estivesse em funcionamento, aberta, aparecia no ecrã com luz acesa. No caso mostrado na figura 3.15 d) nenhuma eletroválvula se encontrava naquele momento aberta, devido ao seu indicador ter a luz apagada. Na figura 3.17 é mostrado a imagem de uma outra janela do software onde, para além da indicação da temperatura e estado da eletroválvula do protótipo 3, em tempo real, também mostra os gráficos de temperatura registados nas 24 horas antecedentes até ao momento do

tanque, permutador e absorsor. O período de aquisição de dados teve início na última semana de Fevereiro e terminou no primeira de Junho.

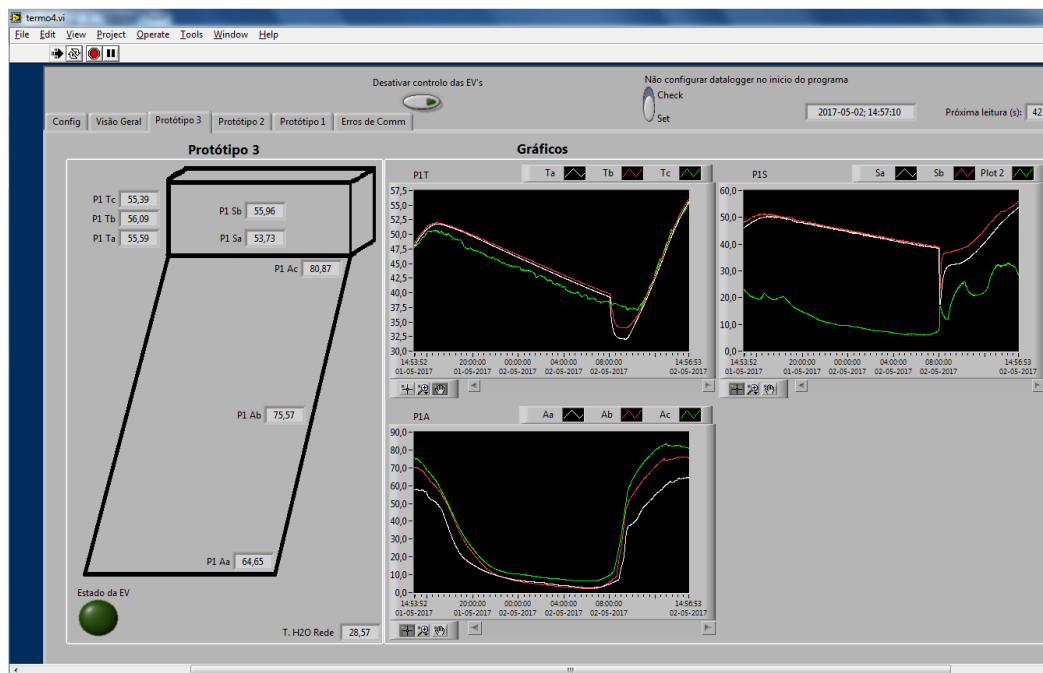


Figura 3.17 – Ambiente do software implementado com indicação de gráficos.

Os dados referentes à radiação incidente, medidos pelo pirâmetro, e da temperatura ambiente foram adquiridos por uma consola específica para aquisição de dados da estação meteorológica existente na J.Prior. O pirâmetro encontra-se instalado no topo dum laboratório, onde se encontra o *data logger* e o computador, próximo dos protótipos indicado na figura 3.18.



Figura 3.18 – Local de instalação do piranómetro.

### 3.5.2 Problemas detetados

Durante o período de aquisição de dados foram detetados alguns problemas no funcionamento dos protótipos que irão ser descritos a seguir.

No primeiro teste realizado de simulação de consumo ao protótipo 2 o tanque ao estar completamente cheio rebentou numa parte onde havia sido soldado, como mostra a figura 3.19 a), devido à pressão da água da rede exercida no seu interior. Estas zonas, que contém solda, são muito propícias a danificaram-se quando sujeitas a elevada pressão. Em virtude deste problema adicionou-se uma válvula redutora de pressão antes da válvula passador manual, figura 3.19 b), e reduziu-se a

pressão de 6 bar para 1 bar, através do regulador existente na válvula que permite regular no intervalo de 1 a 10 bar.

Após colocação da válvula redutora de pressão realizou-se um novo consumo, todavia, o novo valor de pressão imposto ao protótipo 2 era tão baixo que água não conseguiu passar a eletroválvula pelo que não resolveu o problema. Uma outra possível forma de resolver o problema seria acrescentar uma válvula de nível, do tipo boia, para que a partir de um certo nível de água no tanque não fosse possível ultrapassar esse valor, ou seja, o tanque nunca estaria completamente cheio e sob pressão. Apesar da nova solução proposta ser promissora a válvula de nível teria de ser colocada dentro do tanque e para tal teria de se construir um novo tanque mas devido ao tempo limitado para realização desta dissertação não foi possível concretizar. O protótipo 1 têm configuração semelhante ao protótipo 2 e por isso apresenta o mesmo problema e desse modo não foi possível realizar consumos para estes dois protótipos mas apesar disso, os outros testes como por exemplo, determinação de rendimento, perdas térmicas e temperaturas foram realizados.

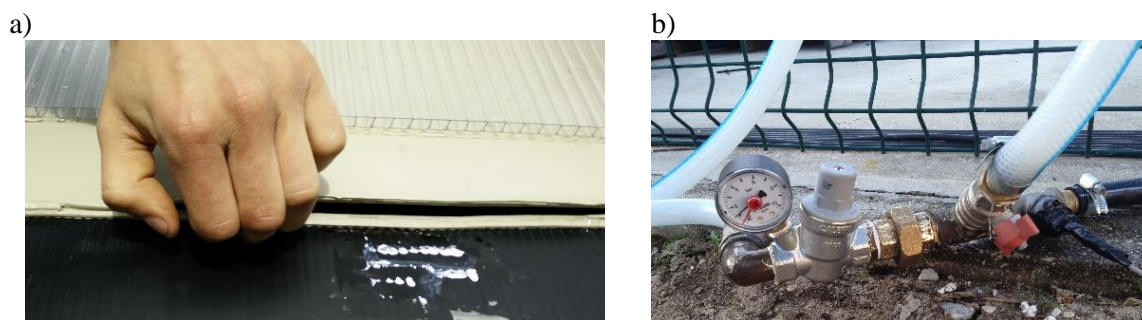


Figura 3.19 – a) Tanque rebentado do protótipo 2) ; b) Válvula redutora de pressão.

Um outro problema detetado referiu-se às sondas de temperaturas. Algumas sondas danificaram-se no decorrer dos meses de aquisição de dados, devido sobretudo à infiltração de água nas bainhas em dias de ocorrência de precipitação, devido a não estarem bem vedadas. Nestes casos as sondas foram substituídas por novas realizando posteriormente o processo calibração e melhoramento da vedação da bainha.



## 4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

### 4.1 Comportamento perante diferentes condições atmosféricas

Na figura 4.1 é apresentado graficamente a radiação incidente registada para quatro dias representativos com diferentes condições atmosféricas seleccionados num conjunto de cerca de 100 dias, de modo a estudar o comportamento do absorsor e do tanque, para cada protótipo, em diferentes condições ambientais. Através da análise do gráfico conclui-se que cada dia, tendo em conta a radiação registada foi caracterizado por:

- Radiação 1: céu nublado com registo essencialmente de radiação baixa e, alguns picos de radiação elevada;
- Radiação 2: céu nublado com registo de radiação baixa ao longo de todo o dia;
- Radiação 3: céu essencialmente limpo, contudo com alguns picos de diminuição de intensidade causada pela presença de nuvens.
- Radiação 4: céu completamente limpo sem presença de nuvens.

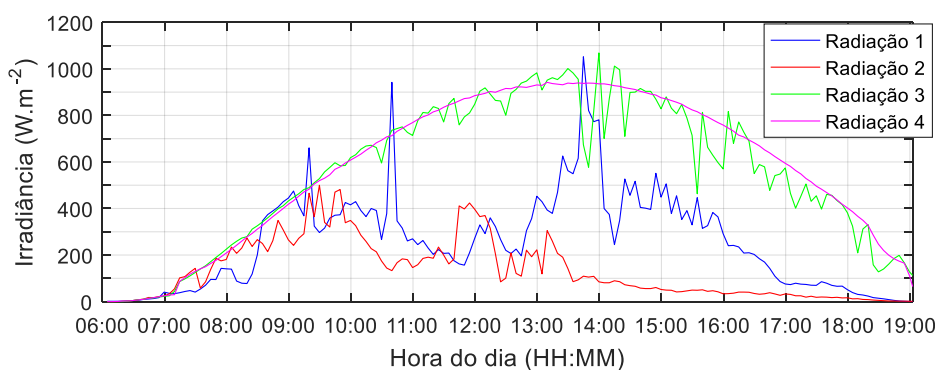


Figura 4.1 – Gráfico da radiação incidente registada em quatro diferentes dias.

Nas figuras 4.2 e 4.3 são apresentados os gráficos das temperaturas registadas nos três absorsores para o dia de radiação 1 e respetiva noite e, também o registo de temperatura ambiente. O absorsor referente ao protótipo 1 foi o que apresentou, durante o dia, menores valores de temperatura que, como esperado, deve-se à ausência de cobertura. Para este protótipo é visível que a temperatura registada no seu topo foi sempre superior à do seu meio durante o dia embora os valores sejam muito próximos. Por outro lado, os absorsores dos protótipos 2 e 3 apresentaram um comportamento muito semelhante ao longo do dia e é bem notório o fenómeno de estratificação onde, no topo foram registadas sempre temperaturas mais elevadas seguido do meio e, por fim no fundo. A estratificação é mais notória nestes dois protótipos porque o uso de cobertura transparente permite a ocorrência do efeito de estufa que consequentemente amplifica a temperatura.

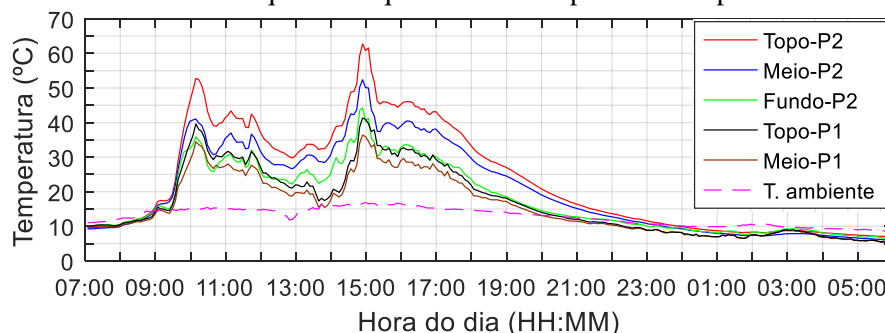


Figura 4.2 – Gráfico de temperaturas registadas no absorsor do protótipo 1 e absorsor do protótipo 2 para o dia de radiação 1.

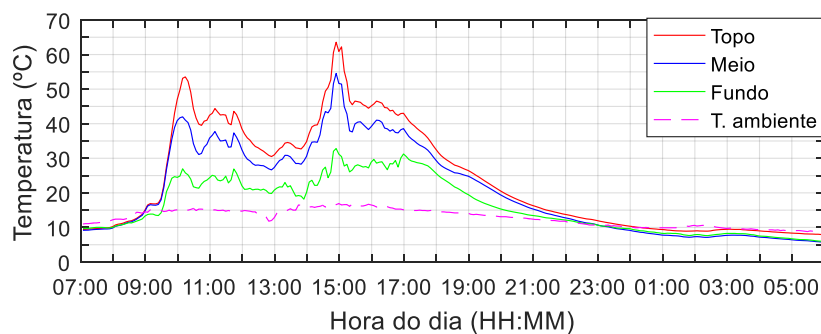


Figura 4.3 - Gráfico de temperaturas registradas no absorsor do protótipo 3 para o dia de radiação 1.

Na ausência de radiação, ou seja, a partir do final da tarde e durante a noite, as temperaturas nos três absorsores desceram bastante. Da análise da figura 4.2 verifica-se que os valores registados, durante a noite, foram ligeiramente abaixo da temperatura ambiente. Em relação às temperaturas exibidas pelos tanques, apresentadas na figura 4.4, o tanque do protótipo 1 foi o que apresentou menor temperatura máxima, ou seja, um menor ganho de energia, justificado pelo seu absorsor ter menores valores de temperatura relativamente aos outros dois. Nos tanques é também notório, porém de forma pouco acentuada, o fenómeno de estratificação, devido à água encontrar-se constantemente em movimento. Por outro lado, no permutador, o fenómeno de estratificação é mais acentuado devido a água contida no seu interior encontrar-se em situação estática e por esse motivo a temperatura alcançada no seu topo é superior.

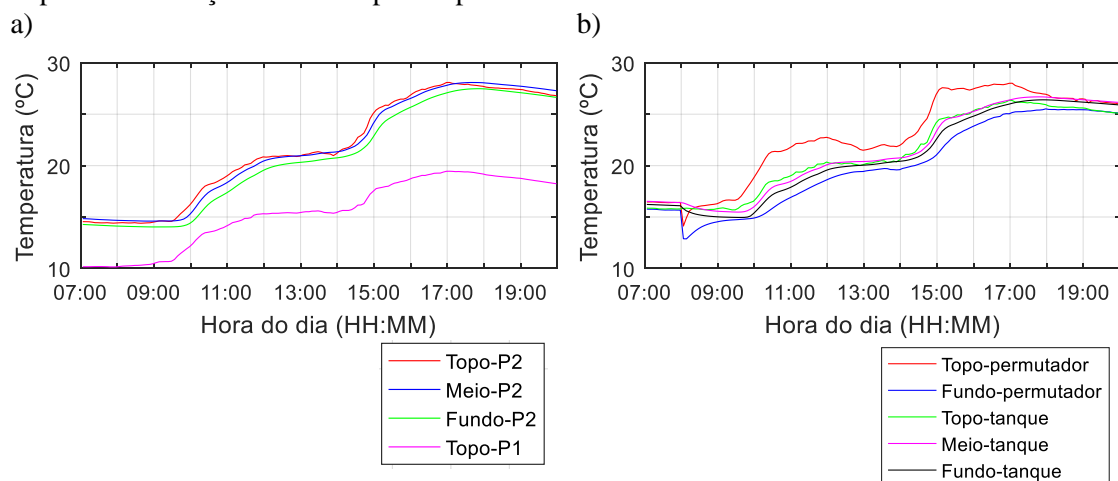


Figura 4.4 -Gráfico de temperaturas registradas nos tanques para o dia de radiação 1: a) tanque de protótipos 1 e 2; b) tanque e permutador do protótipo 3.

No tanque do protótipo 3 observa-se uma queda acentuada na temperatura do fundo do permutador às 8:00 h pois no dia apresentado houve um consumo a essa hora, mas este será um teste que será analisado com maior pormenor na seção 4.3. O mesmo acontece para os outros dias de radiação também mencionados no gráfico da figura 4.1.

Para este dia o maior ganho de energia útil, ou seja, a maior diferença entre a temperatura média máxima atingida e a mínima, foi verificado para o protótipo 2 apresentando um valor de 3999 kJ e o menor ganho para o protótipo 1 com 2765 kJ. O valor de energia útil, também conhecido por calor, foi determinado segundo a equação 1.10 descrita no Capítulo 1.

Para o dia de radiação 2, as temperaturas registradas no topo do absorsor e no topo do tanque para os três protótipos são apresentadas na figura 4.5. As temperaturas registradas para o protótipo 1, tal como verificado no caso anterior, foram inferiores às dos outros dois protótipos. Os protótipos 2

e 3 apresentaram o mesmo valor de temperaturas nos absorsores e temperaturas semelhantes nos tanques.

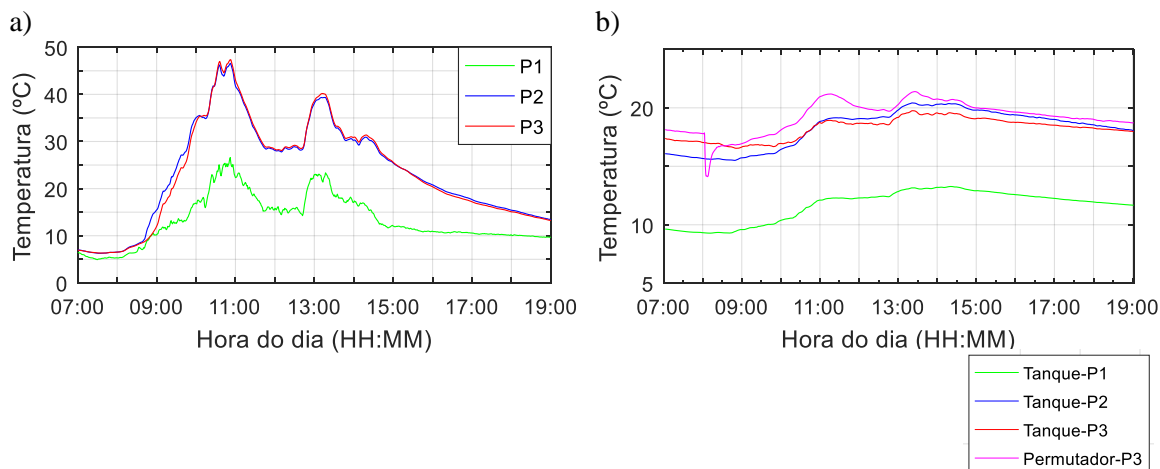


Figura 4.5 – Gráfico de temperaturas registadas no dia de radiação 2 para os três protótipos no topo de: a) absorsores; b) tanque e permutador.

Para este dia a radiação registada foi bastante inferior à do dia de radiação 1 pelo que seria expectável menores valores de temperaturas máximas e, consequentemente menores ganhos de energia. O calor ganho neste dia para os protótipos 1 e 2 foi de 1165 kJ e de 1390 kJ, respetivamente. Em relação ao comportamento da temperatura nos tanques, em ambos os dias, não se verificou um aumento linear, mas sim um aumento com momentos em que a temperatura diminuiu ou se manteve constante justificado pela temperatura registada nos absorsores, devido à radiação incidente.

Apesar dos valores superiores exibidos para o dia de radiação 1 as temperaturas médias máximas atingidas não ultrapassaram os 30 °C pelo que é considerado um valor baixo, que não permite um consumo como desejável, no caso de se pretender água para consumo superior a 45 °C.

As temperaturas exibidas no dia de radiação 3 nos três absorsores e tanques são apresentadas nos gráficos das figuras 4.6, 4.7 e 4.8. Mais uma vez verifica-se que o absorsores e tanque do protótipo 1 apresentam temperaturas inferiores às exibidas pelos outros dois e, o absorsores dos protótipos 2 e 3 apresentam um comportamento muito semelhante.

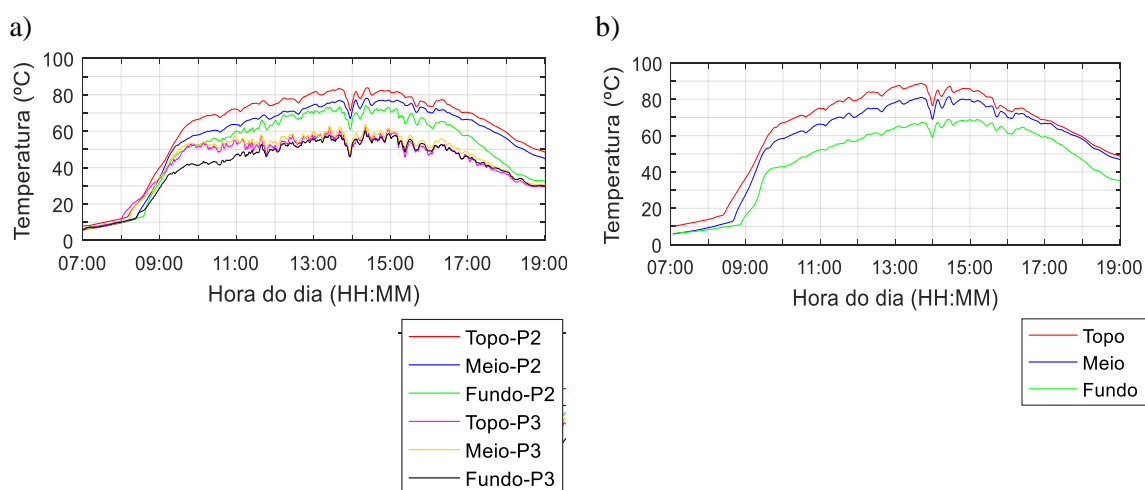


Figura 4.6 Gráfico de temperaturas registadas nos absorsores para o dia de radiação 3: a) dos protótipos 1 e 2; b) absorsores do protótipo 3.

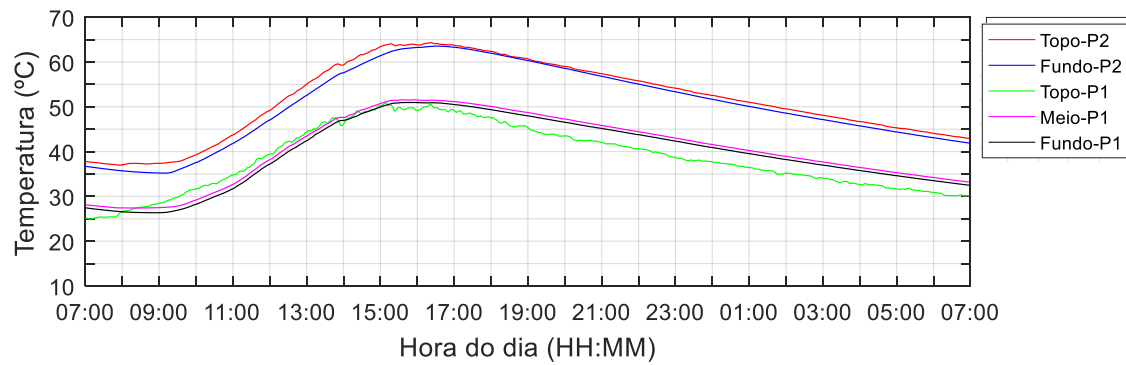


Figura 4.7 - Gráfico de temperaturas registradas no tanque dos protótipos 1 e 2 para o dia de radiação 3.

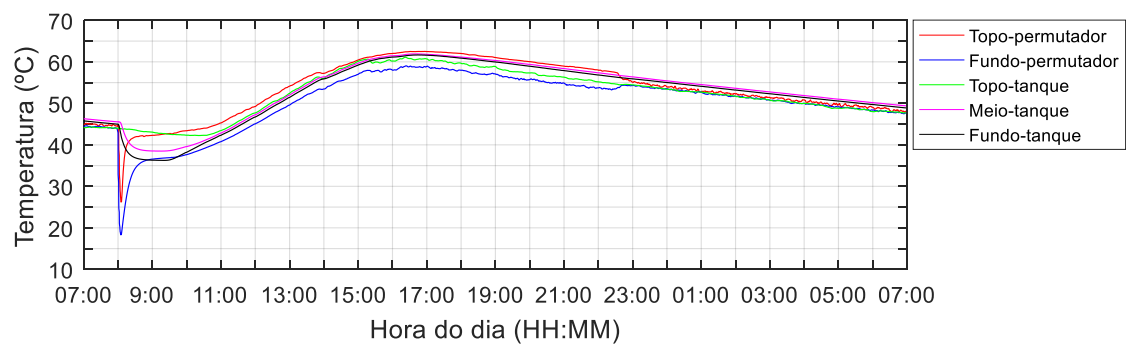


Figura 4.8 - Gráfico de temperaturas registradas no tanque do protótipo 3 para o dia de radiação 3.

Para este dia, devido à radiação incidente, os absorvedores nos três protótipos exibiram valores bastante superiores aos descritos para os dias anteriormente representados e, os valores de temperatura nos tanques no protótipo 1 atingiram os 50 °C e nos protótipos 2 e 3 ultrapassaram os 60 °C. No caso do protótipo 1 tem-se uma temperatura média mínima de aproximadamente 26.8 °C que sobe até 51 °C havendo um aumento de 23.2 °C, e no protótipo 2 tem-se uma temperatura média mínima de aproximadamente 36.3 °C que sobe até 64 °C havendo um aumento de 27.7 °C. Estes valores traduzem-se num ganho de calor útil muito superior aos apresentados nos casos anteriores, onde nos protótipos 1 e 2 foram de 7192 kJ e 8233 kJ, respetivamente.

No caso do dia de radiação 4 as temperaturas exibidas no topo de absorvedor de cada protótipo e no tanque são apresentadas graficamente na figura 4.9.

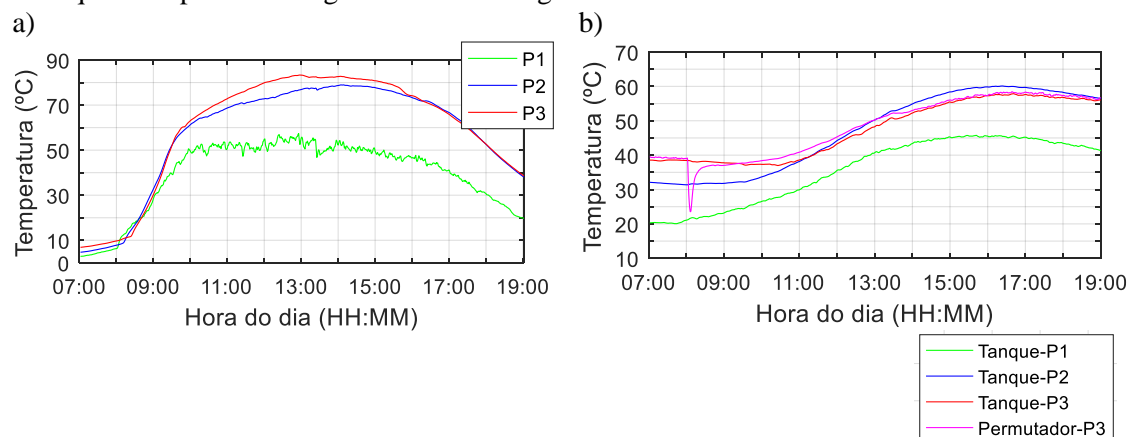


Figura 4.9 – Gráfico de temperaturas registradas no dia de radiação 4 para os três protótipos no topo de: a) absorvedor; b) tanque e permutador.

A partir da análise da figura 4.9 verifica-se também, que as temperaturas atingidas no topo de cada absorvedor são idênticas às exibidas para o dia de radiação 3 descritas na figura 4.6 no entanto com a diferença de que nos protótipos 2 e 3 não apresentaram picos de diminuição de temperatura devido ao comportamento da radiação incidente para esse dia, caracterizado por um dia de céu completamente limpo. A temperatura nos absorvedores começou a subir por volta das 7:00 h e o mesmo se verificou para o dia de radiação 3, todavia, para os dias de radiação 1 e 2 a subida de temperatura teve início mais tarde, por volta das 8:00 h e por volta das 9:00 h respetivamente.

Em relação às temperaturas máximas atingidas no topo do tanque verifica-se que foram abaixo das atingidas para o dia de radiação 3. Embora as temperaturas tenham sido inferiores é necessário salientar que neste dia a temperatura média mínima do protótipo 1 e 2 antes de se iniciar o processo de aquecimento, foi de aproximadamente 21.7 °C e 30.7 °C respetivamente e, no dia de radiação 3 como anteriormente mencionado foram de 26.8 °C e 36.3 °C. Deste modo, apesar de as temperaturas máximas terem sido inferiores, o calor útil foi ligeiramente superior, nomeadamente 7460 kJ para o protótipo 1 e 8619 kJ para o protótipo 2. Os valores de calor útil foram obtidos a partir da temperatura média de cada tanque e não apenas com o valor de temperatura no seu topo.

Numa análise dos quatro exemplos de diferentes dias apresentados pode-se inferir que para cada dia o comportamento em cada tanque e absorvedor foi idêntico ao longo do tempo, isto é, um aumento ou diminuição de temperatura foi registado à mesma hora, apenas diferem nos valores de temperatura. As temperaturas de cada absorvedor durante a noite descenderam para temperaturas próximas da temperatura ambiente como mostram as figuras 4.2 e 4.3. Para os restantes absorvedores não estão apresentadas as temperaturas que exibiram durante a noite mas, em todos eles obteve-se o mesmo comportamento que demonstrado nos gráficos das figuras mencionadas. As temperaturas mínimas registadas nos absorvedores durante a noite não dependem portanto das temperaturas atingidas durante o dia mas apenas da temperatura ambiente noturna presente.

## 4.2 Perdas térmicas

Durante as primeiras semanas de aquisição de dados verificou-se que durante o dia quando era atingida a temperatura máxima nos tanques de cada protótipo, no minuto seguinte já começava a baixar. Em nenhum caso manteve-se a temperatura máxima por algum tempo e durante a noite a temperatura descia bastante apresentando elevados valores de perdas térmicas, descritos no gráfico da figura 4.10 por situação 1. Para minimizar as elevadas perdas existentes adicionou-se lã de rocha entre o tanque e a cobertura transparente no protótipo 3, como mostra a figura 4.11 a). Ao fim de dois dias verificou-se que as perdas ainda continuavam elevadas, descrito na figura 4.10 por situação 2 e, optou-se por também adicionar plástico de bolhas em torno do protótipo na zona do tanque sendo que para essa situação, situação 3, os valores de perdas melhoraram em relação aos obtidos nas duas situações anteriores. Ainda assim, achou-se que seria possível minimizar mais as perdas e, adicionou-se em torno do tanque mais plástico de bolhas e também no seu topo e base, como mostra a figura 4.10 b), e os seus valores são indicados por situação 4. Com este procedimento os valores de perdas obtidas melhoraram significativamente pois enquanto que na situação 3 os valores ultrapassaram em vários dias os 2 W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup> na situação 4 os valores mantiveram-se sempre abaixo.

Na figura 4.10 para as situações 3 e 4 apenas estão mencionadas as perdas térmicas para alguns dias, na prática foram muitos mais, mas grande parte desses valores são bastantes próximos dos apresentados.

Todos os valores de perdas térmicas apresentados foram determinados segundo a equação 1.12 descrita no Capítulo 1.

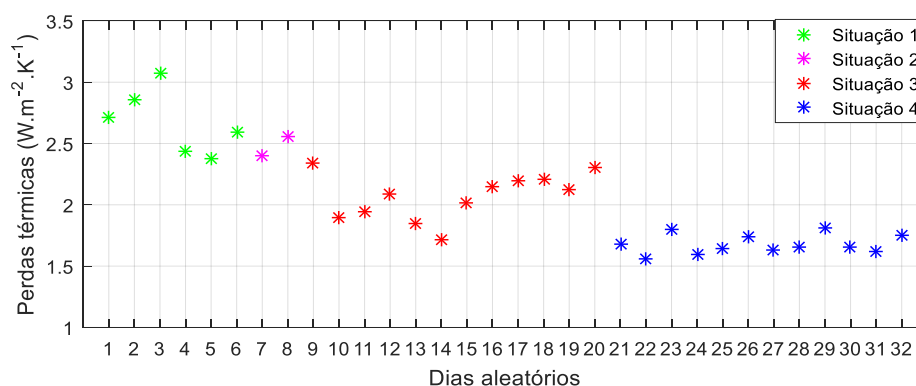


Figura 4.10 - Perdas térmicas exibidas por protótipo 3, ao longo de vários, obtidas em situações diferentes.

a)



b)



Figura 4.11 – Protótipo 3: a) adição de lã de rocha; b) adição de plástico de bolhas.

A adição de lã de rocha e de plástico de bolinhas apenas foi efetuada no protótipo 3 para que pudesse ser comparado os valores obtidos com os outros dois protótipos, nos mesmos dias, ou seja, sob as mesmas condições atmosféricas. Na figura 4.12 é apresentado os valores obtidos para alguns dias escolhidos aleatoriamente onde é possível comparar as perdas térmicas obtidas para cada protótipo no mesmo dia. Para os primeiros 6 dias não são apresentados os valores obtidos para o protótipo 1 porque não estavam a ser adquiridos dados do mesmo.

Na figura 4.12 o dia aleatório 1 refere-se à situação 1 do protótipo 3, os dias 2 e 3 à situação 2, de 4 a 15 à situação 3 e os restantes, dias aleatórios de 16 a 27, à situação 4.

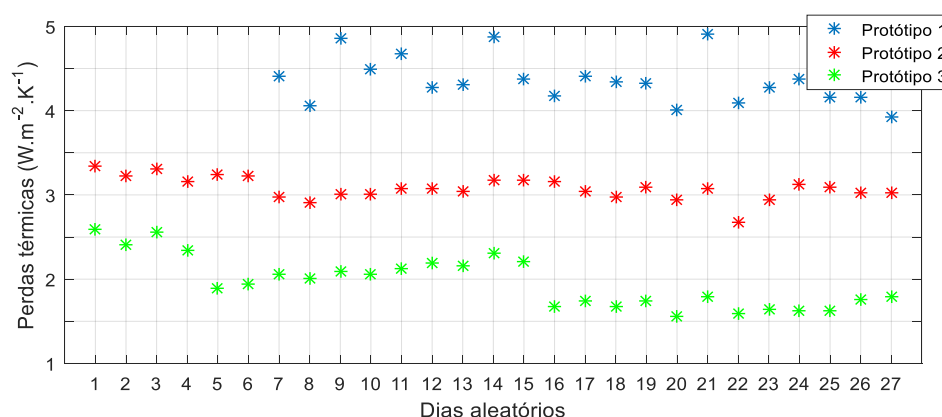


Figura 4.12 – Comparação das perdas térmicas exibidas pelos protótipos ao longo de vários dias.

O dia aleatório 26 refere-se ao dia apresentado na seção anterior por radiação 3 e as temperaturas exibidas no tanque de cada protótipo foram apresentadas nas figuras 4.7 e 4.8. Da análise das figuras verifica-se que por volta das 17:00 h as temperaturas nos tanques começaram a descer. Para o

protótipo 1 há uma queda da sua temperatura máxima de aproximadamente 50.9 °C para 31.2 °C até ao início da manhã traduzindo numa diminuição de 19.7 °C apresentando 4.5 W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup> em valor de perdas térmicas. Para o protótipo 2 desceu de aproximadamente 63.9 °C para 41.5 °C, ou seja, diminuição de 22 °C ainda assim, o valor de perdas térmicas, 3.02 W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup>, foi inferior ao apresentado para o protótipo 1. Apesar da temperatura ter sofrido uma maior descida no protótipo 2 o seu valor de perdas foi inferior pois a temperatura máxima alcançada foi 13 °C superior.

No protótipo 3, para o dia aleatório 26, a temperatura máxima atingida foi de 61 °C e sofreu uma descida durante o período noturno até 47.7 °C verificando-se uma queda de 13.3 °C e como valor de perdas 1.75 W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup>. A menor queda de temperatura e consequentemente menor valor de perdas em comparação com os outros protótipos mostra que a utilização de lã de rocha e plástico de bolhas tem um efeito minimizante.

Os elevados valores de perdas térmicas não foram unicamente referentes a dias em que foram atingidas elevadas temperaturas máximas e consequentemente quedas na ordem de 15 °C ou 20 °C por exemplo. Os elevados valores foram verificados para qualquer tipo de dia, por exemplo, na figura 4.4 está representando um dia em que as temperaturas máximas não atingiram sequer os 30 °C e as quedas de temperatura nos protótipos 2 e 3, em que se refere à situação 3, foram de 7.5 °C e 4.8 °C e no entanto, os valores de perdas foram de 2.73 W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup> e 1.72 W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup>, respetivamente. Para além do poder isolante dos materiais outro fator que pode afetar as perdas refere-se ao vento mas como não é contabilizado em cálculos não se tem a perceção dos seus efeitos.

### 4.3 Resposta ao consumo

Foram realizados vários testes de consumo no protótipo 3, em quatro horários diferentes, por forma a determinar quanto tempo após um dado consumo demoraram a recuperar até à temperatura anterior ao consumo. Os horários escolhidos foram, às 08:00 h durante 5 minutos, às 08:00 h durante 5 minutos e às 12:00 h durante 5 minutos, às 09:50 h durante 5 minutos e às 13:00 h durante 7 minutos e por último, às 18:00 h durante 5 minutos.

O caudal em todos os testes esteve regulado para aproximadamente um consumo de 6.5 litros por minuto o que significa que num consumo durante 5 minutos são consumidos cerca de 32 litros de água e num consumo de 7 minutos 45 litros. À medida que decorre um consumo a quantidade de água quente que sai pelo topo do permutador é reposta por água da rede que entra, como mencionado no Capítulo 2, para o seu fundo. Em todos os exemplos a seguir apresentados, exceto o último, a válvula misturadora não estava regulada para a temperatura de 45 °C e deste modo, em todos os consumos que serão apresentados a temperatura da água após a passagem pela válvula misturadora é dada pela temperatura do topo do permutador durante o decorrer do consumo.

Na figura 4.13 são apresentados graficamente os valores de temperaturas obtidos para um consumo realizado às 08:00 h com indicação da radiação incidente e dos valores para o topo do tanque nos protótipos 1 e 2.

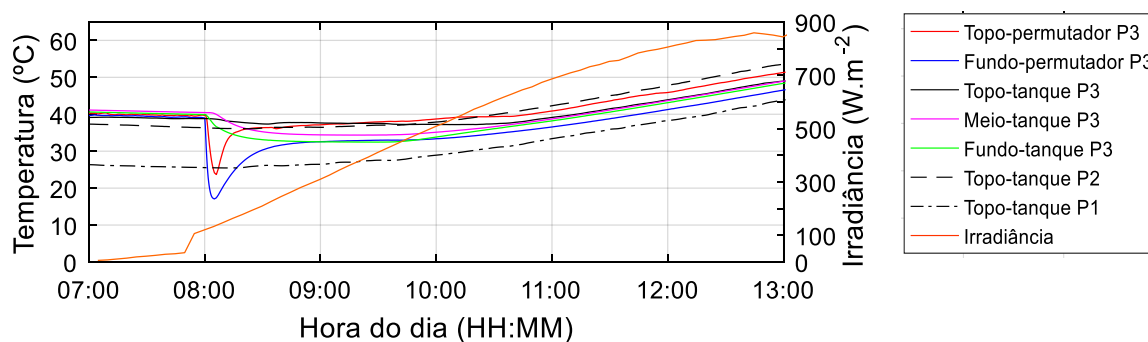


Figura 4.13 – Temperatura registada após consumo no protótipo 3 às 08:00 h durante cinco minutos.



Da análise do gráfico verifica-se que inicialmente a temperatura no topo do permutador é de 39.8 °C e depois do consumo baixa para 24 °C e após 2 horas e 40 minutos é que volta a atingir a temperatura inicial no seu topo, ou seja, às 10:45 h.

Na figura 4.14 são apresentados os valores de temperatura obtidos para um consumo realizado às 08:00 h e de seguida às 12:00 h. Para o primeiro teste a temperatura inicial registada no topo do permutador foi de 42.8 °C e após o consumo baixou para 26.5 °C e voltou a atingir a temperatura inicial às 11:25 h, ou seja, demorou 3 horas e 20 minutos a recuperar. No segundo teste recuperou a sua temperatura inicial, 44.3 °C, às 12:50 h ou seja, após 43 minutos.

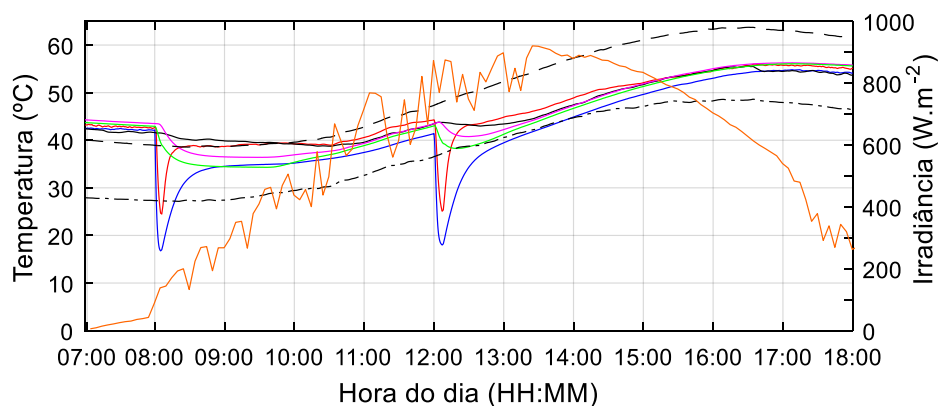


Figura 4.14 – Temperatura registada após consumo no protótipo 3 às 08:00 h durante 5 minutos e às 12:00 h durante 7 minutos. (Legenda indicada na figura 4.13)

Na figura 4.15 são apresentados os valores de temperatura para um consumo às 18:00 h. Devido ao consumo a temperatura no topo do permutador baixou de aproximadamente 30 °C para 22 °C e nunca voltou a recuperar o seu valor inicial o que seria espectável pois já não havendo radiação elevada a esta hora e, consequentemente baixa temperatura no absorvedor, abaixo dos 35 °C, apenas há transferência de calor entre o tanque e o permutador não havendo possibilidade de elevar a sua temperatura até à inicial.

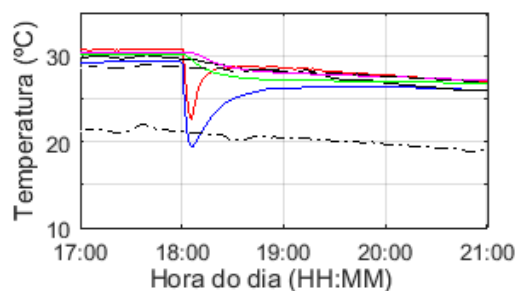


Figura 4.15 – Temperatura registada após consumo no protótipo 3 às 18:00 h durante 5 minutos. (Legenda indicada na figura 4.13)

Na tabela 4.1 são apresentados outros exemplos da temperatura registada no topo do permutador em dias em que foram efetuados testes de consumo com indicação do tempo de recuperação. Da análise dos exemplos apresentados verifica-se que para os consumos realizados às 08:00 h os tempos de recuperação foram os mais demorados pois a esta hora a temperatura nos absorvedores ainda é baixa, independentemente do tipo de condições climáticas que se verificaram ao longo do dia. Para consumos realizados às 12:00 h ou às 12:50 h os tempos de recuperação foram geralmente inferiores a 1 hora pois a radiação presente nesses dias por volta dessa hora foi elevada.

Na tabela 4.1 repare-se que no 3º dia apresentado o tempo de recuperação para o consumo às 09:50 h foi longo, mas no consumo às 12:50 h foi apenas 43 minutos devido à hora em que ocorreu, como explicado anteriormente. E, no último dia o consumo às 09:50 h apresentou um tempo de recuperação bastante curto, comparativamente ao 3º dia representado, justificado por este dia ter sido caracterizado como um dia de céu essencialmente limpo com radiação elevada. Às 10:00 h a radiação já era bastante próxima de 600 W.m<sup>-2</sup> e a temperatura no topo do absorvedor ultrapassava os 60 °C.



Tabela 4.1 – Tempo de recuperação para diferentes testes de consumo.

Hora de consumo	Duração (minutos)	T. inicial (°C)	T. após consumo (°C)	Hora de recuperação	Tempo de recuperação
08:00	5	40.3	23.4	10:42	02:37
12:00	7	46.0	25.0	12:50	00:43
08:00	5	43.2	24.8	11:50	03:45
12:00	7	43.8	25.8	13:08	01:01
09:50	5	41.0	26.5	12:35	02:40
12:50	7	43.4	26.3	13:40	00:43
09:50	5	36.2	24.6	10:20	00:25
12:50	7	46.9	27.5	13:47	00:50

Na figura 4.16 são apresentadas as temperaturas registadas para dois consumos em que o primeiro foi realizado às 12:00 h e o seguinte às 16:15 h. Para este exemplo o caudal esteve regulado para aproximadamente 4.5 litros por minuto e ambos os consumos tiveram a duração de 10 minutos o que significa que foram consumidos, em cada, 45 litros de água. Em relação à válvula misturadora esteve regulada para uma saída de temperatura de aproximadamente 45 °C, em que a escolha de temperatura foi feita manualmente, como se pode ver pela imagem da válvula utilizada indicada na figura 3.1 b) no Capítulo 3.

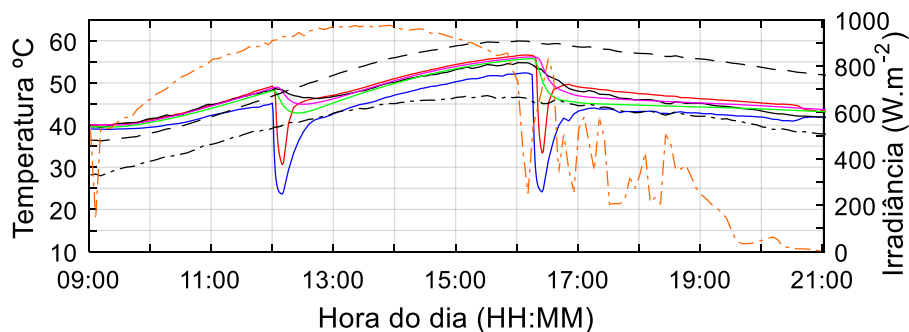


Figura 4.16 – Temperatura registada após consumo no protótipo 3 às 12:00 h durante 10 minutos e às 16:15 h durante 10 minutos. (Legenda indicada na figura 4.13)

Como se pode visualizar na figura 4.17 com a utilização da válvula misturadora regulada e dado que a temperatura inicial em ambos os consumos foi superior a 45 °C, verifica-se que como esperado a temperatura no topo do permutador não decaiu logo durante o início do consumo.

Em todos os testes de consumo apresentados é visível que imediatamente após o consumo terminar iniciou-se a transferência de calor entre o tanque e o permutador.

Em virtude dos consumos no protótipo 3 as temperaturas máximas atingidas nesses dias foram sempre inferiores ao protótipo 2 e em dias com dois consumos a diferença foi mais significativa. Por exemplo, no dia representado na figura 4.14 a temperatura média máxima atingida pelo protótipo 2 foi de 63.6 °C e no protótipo 3 foi de 55.3 °C, ainda assim foi atingido um valor alto. Por outro lado, as temperaturas máximas atingidas no protótipo 3 foram superiores às exibidas pelo protótipo 1 mesmo quando eram efetuados dois consumos no mesmo dia.

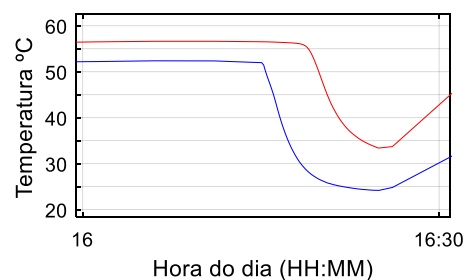


Figura 4.17 – Temperatura registada durante consumo no protótipo 3 às 16:00 h. (Retirado de gráfico da figura 4.16).

## 4.4 Rendimento

O cálculo do rendimento do sistema foi realizado com dados obtidos desde às 08:00 h de cada dia até às 08:00 h do dia seguinte estudando desta forma o seu comportamento ao longo de um dia completo. Na tabela 4.2 são apresentados os valores obtidos para o rendimento, em dias aleatórios, com indicação da temperatura média inicial, máxima e final atingidas nos tanques, incluído no caso do protótipo 3 o permutador. As equações utilizadas para determinação do rendimento são as equações 1.8 a 1.11 descritas no Capítulo 1 para sistemas solares do tipo termossifão.

Em todos os dias apresentados na tabela 4.2 não foi realizado de qualquer tipo de consumo no protótipo 3.

Analisando a tabela 4.2 verifica-se que os valores de rendimento obtidos foram baixos o que em parte é justificado por nesta análise estar a ser considerado o comportamento dos protótipos durante período noturno. E, como já apresentado anteriormente, durante a noite os protótipos apresentaram elevadas perdas térmicas.

O rendimento do sistema foi negativo nalguns dias, como por exemplo o dia 4, o que significa que nestes dias o valor de energia libertada sob a forma de perdas foi superior à energia útil. Em todos os dias em que apresentou rendimento negativo, a temperatura inicial foi inferior à temperatura final no dia seguinte, isto é, após 24 horas.

Tabela 4.2 – Rendimento do sistema obtido para alguns dias aleatórios.

<b>Dia</b>	<b>Protótipo</b>	<b>T. inicial (°C) às 08:00h</b>	<b>T. máxima atingida (°C)</b>	<b>T. final (°C) às 08:00h do dia seguinte</b>	<b>Rendimento Sistema (%)</b>
<b>1</b>	P1	23.4	40.8	27.8	<b>6.97</b>
	P2	30.0	48.4	34.3	<b>6.99</b>
	P3	35.1	49.2	40.2	<b>8.23</b>
<b>2</b>	P1	19.3	32.0	21.7	<b>3.37</b>
	P2	27.0	42.0	29.5	<b>3.87</b>
	P3	28.4	41.8	34.1	<b>8.82</b>
<b>3</b>	P1	27.7	46.3	28.8	<b>1.69</b>
	P2	34.3	54.8	35.8	<b>2.37</b>
	P3	40.1	56.3	43.8	<b>5.78</b>
<b>4</b>	P1	21.6	32.7	21.3	<b>-0.62</b>
	P2	29.5	42.6	28.9	<b>-1.04</b>
	P3	34.1	43.6	34.4	<b>0.49</b>
<b>5</b>	P1	21.7	43.0	23.8	<b>2.86</b>
	P2	31.1	55.6	33.0	<b>2.06</b>
	P3	41.5	58.4	44.3	<b>3.02</b>
<b>6</b>	P1	27.2	54.5	34.4	<b>8.16</b>
	P2	35.6	64.0	42.5	<b>7.84</b>
	P3	46.0	66.0	50.1	<b>4.97</b>

Apesar de o protótipo 3 durante a aquisição destes dados já estar na situação 4, em que devido à adição de plástico de bolhas ocorreu minimização das perdas, nem sempre apresentou o rendimento mais elevado de entre os três protótipos. Exemplo disso é o mostrado para o dia 6 da tabela 4.2 em que o protótipo 1 revelou um rendimento cerca de 60% superior ao protótipo 3.

Na figura 4.18 é apresentado graficamente a temperatura média de cada tanque, incluindo o permutador, para o dia 6 da tabela 4.2, com indicação também da radiação incidente e temperatura ambiente. Neste dia, a radiação incidente não apresentou momentos de picos de intensidade o que significa que foi um dia de céu limpo e sem presença de nuvens. Por esta razão, determinou-se o rendimento dos protótipos só de dia pois como mencionado no capítulo 1, na secção referente ao rendimento este, deve ser determinado com uma curva de radiação regular. Para tal seleccionaram-se

os dados entre as 10:30 h e as 16:30 h pois neste intervalo de tempo a intensidade da radiação foi superior a  $700 \text{ W.m}^{-2}$ . Os valores obtidos para os protótipos 1, 2 e 3 foram 36.26%, 41.57% e 30.90%, respetivamente. Apesar do protótipo 1 apresentar maior rendimento que o protótipo 3 é necessário realçar que estes valores não correspondem aos valores reais. Para se obter valores de rendimento fiáveis seria necessário que a temperatura de manhã nos protótipos, antes de se iniciar o processo de aquecimento, fosse exatamente a mesma.

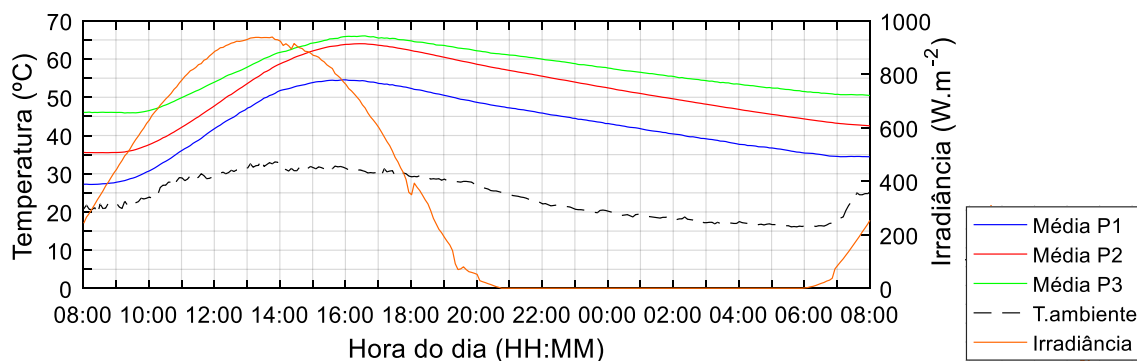


Figura 4.18 – Gráfico de temperaturas médias registadas no tanque de cada protótipo ao longo do dia 6 mencionado na tabela 4.2.

O dia de radiação 4 apresentado no início deste capítulo, figura 4.1, também foi caracterizado por um dia de céu limpo com intensidade de radiação incidente muito idêntica ao mostrado na figura 4.18 e devido à radiação regular determinou-se o rendimento de dia. Foram então selecionados os dados correspondentes à gama em que a radiação foi superior a  $700 \text{ W.m}^{-2}$  obtendo-se para os protótipos 1, 2 e 3 os valores 35.65%, 43.14% e 37.01%, respetivamente. Neste dia houve um consumo no protótipo 3 às 08:00h e à hora em que se iniciou a seleção de dados a recuperação já estava efetuada todavia, o valor obtido de rendimento é de certa forma influenciado, isto é, ligeiramente abaixo do que se obteria se não tivesse havido um consumo.

O rendimento determinado só de dia para o protótipo 2 apresentou nestes dois exemplos o maior valor de rendimento. Repare-se na figura 4.18 que apesar da temperatura média no tanque às 08:00h ser cerca de  $10^\circ\text{C}$  inferior à do protótipo 3 consegue atingir uma temperatura máxima muito próxima o que revela que o ganho de energia útil no protótipo 2 foi superior. Neste dia o valor de energia útil, na gama acima dos  $700 \text{ W.m}^{-2}$ , para os protótipos 1, 2 e 3 foi 6380 kJ, 7313 kJ e 5437 kJ, respetivamente. O baixo ganho de energia do protótipo 3 em relação aos outros dias é em parte justificado por existir uma dada temperatura máxima a partir da qual não é possível subir mais, tendo em conta as temperaturas registadas no absorvedor. No caso do dia de radiação 4 a energia útil obtida, na mesma gama, foi 5990 kJ, 7249 kJ e 6229 kJ, respetivamente.

O estudo dos protótipos foi efetuado com dados obtidos a partir de um contexto real, ou seja, expostos às condições climáticas presentes durante alguns meses não tendo sido aplicadas as condições exigidas pelas normas que visam certificar os sistemas termossifão. Deste modo, os dados obtidos para rendimento não serão comparados com os sistemas termossifão já existentes no mercado pois esses apresentam valores obtidos segundo as normas. Para se comparar os dados de rendimento exibidos pelos protótipos teria de se ter efetuado o estudo segundo as normas ou teria de se ter colocado um coletor termossifão que exista à venda no mercado ao lado dos protótipos para dessa forma comparar-se valores obtidos sob as mesmas condições experimentais. Neste último caso a capacidade e área dos coletores teria de ser a mesma o que implica que teria de se utilizar 2 coletores por cada protótipo para se obter uma área de aproximadamente  $2 \text{ m}^2$  e capacidade de 150 litros pois são as dimensões mínimas do que existe no mercado, como mencionado na seção 1.4.4 do Capítulo 1. Pelo mesmo motivo, o tempo de recuperação após um consumo não pode ser classificado como lento ou rápido pois nas mesmas condições não se sabe exatamente como um termossifão do mercado comportar-se-ia.

## 5. CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

---

Na presente dissertação foi realizado a construção e estudo de três painéis solares do tipo termossifão constituídos essencialmente por materiais poliméricos em que o absorvedor utilizado é baseado num novo tipo de material à base de PP.

Os protótipos revelaram elevados valores de perdas em que nalguns casos chegou a verificar-se quedas de temperatura durante a noite na ordem dos 20 °C mas com a adição de lã de rocha e plástico de bolhas as perdas térmicas apresentadas pelo protótipo 3 melhoraram significativamente, no entanto, apenas serviu para efeitos de teste, para produção não será considerada esta hipótese.

Os valores de rendimento dos protótipos, considerando o comportamento de dia e de noite, foram baixos como consequência da baixa capacidade de isolamento apresentada pelos três protótipos. Todavia, considerando o comportamento apenas para o intervalo de tempo em que a radiação foi acima de 700 W.m<sup>-2</sup> obteve-se valores em média superiores a 35%.

Em relação às temperaturas máximas exibidas no tanque de cada protótipo conclui-se que os protótipos 2 e 3 apresentaram sempre temperaturas muito próximas sendo que em dias de consumo as temperaturas exibidas pelo protótipo 3 foram ligeiramente inferiores e que, o protótipo 1 apresentou sempre temperaturas máximas bastante inferiores. Isso mostra que apesar da cobertura transparente bloquear alguma radiação incidente a sua utilização é vantajosa pois permite a criação do fenómeno efeito de estufa e, consequentemente um maior ganho de temperatura.

Em dias de radiação elevada, mesmo que com alguns momentos de picos de diminuição e intensidade, as temperaturas nos tanques no protótipo 1 atingiram os 50 °C e nalguns casos este valor foi ultrapassado e, nos outros dois protótipos ultrapassou os 60 °C. Estes valores mostram que os protótipos têm capacidade para atingir temperaturas superiores às recomendadas para consumo numa habitação diminuindo nesses dias o consumo de água quente pois é adicionada água da rede para regulação para os 45 °C.

Os protótipos estudados apresentam a vantagem de serem constituídos por materiais mais baratos e consequentemente menor custo final por sistema e não têm quaisquer componentes elétricas não havendo assim qualquer tipo de consumo de eletricidade.

A construção dos três protótipos permitiu devido às suas diferentes configurações efetuar comparações com o objetivo de se saber qual o mais apropriado para aplicações domésticas mesmo não tendo sido efetuados consumos nos protótipos 1 e 2. Comparando os protótipos 1 e 2 claramente o protótipo 2 revelou melhor desempenho devido à utilização de cobertura. Por outro lado, comparando o protótipo 2 com o 3 e apesar de ambos apresentarem o mesmo comportamento no que se refere às temperaturas máximas exibidas, o protótipo 3 devido a possuir permutador é mais adequado para aplicações domésticas pois quando há um consumo não entra água fria da rede no circuito absorvedor tanque.

Em suma, os protótipos estudados revelaram que apesar das perdas térmicas verificadas, que futuramente podem ser minimizadas com a utilização de outro tipo de isolamento, como por exemplo o poliuretano, têm potencial para a produção AQS a temperaturas requeridas. É ainda importante referir que estes protótipos foram os primeiros a serem construídos e deste modo servem como ponto de partida para um produto que pode ser bastante melhorado.

Como trabalho futuro sugere-se:

- Estudo de possibilidade de um permutador com maior capacidade;
- Construção de novos protótipos em que os sem permutador irão conter válvula de nível para ser possível realizar testes de consumo;
- Utilização de poliuretano como isolamento;
- Colocação de piranómetros junto aos coletores;
- Colocação de um painel do tipo termossifão que exista à venda do mercado junto aos protótipos para servir como comparação;
- Estudo do impacto do vento;

- Ensaios de envelhecimento por forma a determinar o tempo de vida útil dos materiais utilizados.

Após a realização das etapas descritas devem ser calculados os novos valores de perdas térmicas, tempo de recuperação após consumo, rendimento etc. e, quando estes valores forem comparáveis aos exibidos pelos painéis tradicionais que existem no mercado deve ser efetuado o estudo do processo de industrialização.

Os protótipos apresentados foram construídos manualmente, mas, para industrialização é necessário efetuar algumas modificações como por exemplo, no que se refere à construção do tanque através do ato de soldagem. Por este motivo não foram apresentados os custos inerentes à construção dos protótipos. A seguir, deve ser realizada a certificação, ou seja, enviar os protótipos para um laboratório especializado que irá certificá-los e por fim, dar-se início à produção.

## BIBLIOGRAFIA

---

- [1] E. Brutschin e A. Fleig, «Innovation in the energy sector - The role of fossil fuels and developing economies», *Energy Policy*, vol. 97, pp. 27–38, 2016.
- [2] Z. Şen, «Solar energy in progress and future research trends», *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 30, n. 4, pp. 367–416, 2004.
- [3] J. P. Dorian, H. T. Franssen, e D. R. Simbeck, «Global challenges in energy», vol. 34, pp. 1984–1991, 2006.
- [4] «United Nations». [Em linha]. Disponível em: <http://www.un.org/sustainabledevelopment/>. [Acedido: 08-Dez-2016].
- [5] S. Kalaiselvam e R. Parameshwaran, *Thermal Energy Storage Technologies for Sustainability: Systems Design, Assessment and Applications*. 2014.
- [6] Y. Tian e C. Y. Zhao, «A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications», *Appl. Energy*, vol. 104, pp. 538–553, 2013.
- [7] J. M. Lemos, R. Neves-Silva, e J. M. Igreja, *Adaptive Control of Solar Energy Collector Systems*. 2014.
- [8] G. N. Tiwari, A. Tiwari, e Shyam, *Handbook of Solar Energy (Theory, Analysis and Applications)*. 2016.
- [9] S. Seddegh, X. Wang, A. D. Henderson, e Z. Xing, «Solar domestic hot water systems using latent heat energy storage medium: A review», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 49, pp. 517–533, 2015.
- [10] «Solar Heating & Cooling Programme - International Energy Agency». [Em linha]. Disponível em: <http://www.iea-shc.org/>. [Acedido: 09-Dez-2016].
- [11] «Energia em Portugal - 2014», *Direção geral de Energia e Geologia*. [Em linha]. Disponível em: <http://www.dgeg.pt/>. [Acedido: 01-Nov-2016].
- [12] B. Carlsson, H. Persson, M. Meir, e J. Rekstad, «A total cost perspective on use of polymeric materials in solar collectors - Importance of environmental performance on suitability», *Appl. Energy*, vol. 125, pp. 10–20, 2014.
- [13] M. Povacz *et al.*, «Novel Solar Thermal Collector Systems in Polymer Design – Part 3: Aging Behavior of PP Absorber Materials», *Energy Procedia*, vol. 91, pp. 392–402, 2016.
- [14] B. Carlsson, M. Meir, J. Rekstad, D. Preiß, e T. Ramschak, «Replacing traditional materials with polymeric materials in solar thermosiphon systems - Case study on pros and cons based on a total cost accounting approach», *Sol. Energy*, vol. 125, pp. 294–306, 2016.
- [15] M. Koehl, S. Saile, A. Piekarczyk, e S. Fischer, «Task 39 exhibition - Assembly of polymeric components for a new generation of solar thermal energy systems», *Energy Procedia*, vol. 48, pp. 130–136, 2014.
- [16] M. Thirugnanasambandam, S. Iniyan, e R. Goic, «A review of solar thermal technologies», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, n. 1, pp. 312–322, 2010.
- [17] D. Madeira, «Dan Scientia - Ciências Matemáticas, Físicas e Computacionais». [Em linha]. Disponível em: <http://dan-scientia.blogspot.pt/2010/07/particularidades-dos-movimentos-da.html>. [Acedido: 26-Abr-2017].
- [18] T.-W. Lee, «Thermal and flow measurements», p. 390, 2008.
- [19] R. A. Serway, C. J. Moses, e C. A. Moyer, *Modern Physics*, 3ª Edition. 2003.
- [20] J. a. Duffie, W. a. Beckman, e W. M. Worek, *Solar Engineering of Thermal Processes*, vol. 116. 2003.

- [21] D. Y. Goswami, *Principles of Solar Engineering*, vol. 1. 2015.
- [22] E. F. Schubert, *Light-emitting diodes*, 2.<sup>a</sup> ed. 2006.
- [23] J. Twidell e T. Weir, *Renewable Energy Resources*, vol. 532, n. 1. 2006.
- [24] M. Kohl, M. G. Meir, P. Papillon, G. M. Wallner, e S. Saile, *Polymeric Materials for Solar Thermal Applications*. 2012.
- [25] Z. Wang, W. Yang, F. Qiu, X. Zhang, e X. Zhao, «Solar water heating: From theory, application, marketing and research», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 41, pp. 68–84, 2015.
- [26] S. A. Kalogirou, «Solar thermal collectors and applications», *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 30, n. 3, pp. 231–295, 2004.
- [27] R. Shukla, K. Sumathy, P. Erickson, e J. Gong, «Recent advances in the solar water heating systems: A review», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 19, pp. 173–190, 2013.
- [28] A. Olivares, J. Rekstad, M. Meir, S. Kahlen, e G. Wallner, «Degradation model for an extruded polymeric solar thermal absorber», *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 94, n. 6, pp. 1031–1037, 2010.
- [29] M. G. M. Choudhury, «Selective Surface for efficient Solar Thermal Conversion», *Bangladesh Renew. Energy Newsl.*, vol. 1, n. 2, pp. 2000–2002, 2002.
- [30] W. C. Dunn, *Introduction to Instrumentation, Sensors, and Process Control*. 2006.
- [31] Diário da República, «Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE), Decreto-Lei n.º 80/2006», *Diário da República - I Série - A - n.º 67*, p. 46(2468-2513), 2006.
- [32] «Trilhos energéticos - Soluções sustentáveis». [Em linha]. Disponível em: <http://trilhosenergeticos.pt/>. [Acedido: 02-Dez-2016].
- [33] R. Singh, I. J. Lazarus, e M. Souliotis, «Recent developments in integrated collector storage (ICS) solar water heaters: A review», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 54, pp. 270–298, 2016.
- [34] M. Swiatek, G. Fraisse, e M. Pailha, «Stratification enhancement for an integrated collector storage solar water heater (ICSSWH)», *Energy Build.*, vol. 106, pp. 35–43, 2015.
- [35] A. A. Mohamad, «Integrated solar collector-storage tank system with thermal diode», *Sol. Energy*, vol. 61, n. 3, pp. 211–218, 1997.
- [36] S. Sathishkumar e T. Balusamy, «Performance improvement in solar water heating systems - A review», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 37, pp. 191–198, 2014.
- [37] T. Ramschak, R. Hausner, e C. Fink, «Polymeric Materials in Solar-thermal Systems - Performance Requirements and Loads», *Energy Procedia*, vol. 91, pp. 105–112, 2016.
- [38] «Daikin». [Em linha]. Disponível em: [www.daikin.pt](http://www.daikin.pt). [Acedido: 14-Mar-2017].
- [39] M. Esen e H. Esen, «Experimental investigation of a two-phase closed thermosyphon solar water heater», *Sol. Energy*, vol. 79, n. 5, pp. 459–468, 2005.
- [40] «CENFIM- Centro de Formação Profissional da Indústria Metalúrgica e Metalomecânica». [Em linha]. Disponível em: <http://www.cenfim.pt/>. [Acedido: 04-Abr-2017].
- [41] «Guia para Instaladores de Coletores Solares - Aquecimento de Água com Garantia de Qualidade», 2004.
- [42] «Energia Solar Térmica - manual sobre tecnologias, projeto e instalação (2004)», Disponível em [www.portal-energia.com](http://www.portal-energia.com).
- [43] «Plexicril - Empresa». [Em linha]. Disponível em: [www.plexicril.com](http://www.plexicril.com). [Acedido: 21-Dez-2016].
- [44] E. Moretti, M. Zinzi, e E. Belloni, «Polycarbonate panels for buildings: Experimental

- investigation of thermal and optical performance», *Energy Build.*, vol. 70, pp. 23–35, 2014.
- [45] J. Brydson, *Brydson's Plastics Materials*, 8.<sup>a</sup> ed. Matthew Deans, 2016.
- [46] M. Barletta, M. Puopolo, G. Rubino, V. Tagliaferri, e S. Vesco, «Hard transparent coatings on thermoplastic polycarbonate», *Prog. Org. Coatings*, vol. 90, pp. 178–186, 2016.
- [47] M. Kutz, *Applied Plastic Engineering Handbook*, vol. 53, n. 9. 2013.
- [48] D. Tripathi, *Practical Guide to Polypropylene*. Rapra Technology Ltd, 2002.
- [49] H. A. Maddah, «Polypropylene as a Promising Plastic: A Review», *Am. J. Polym. Sci.*, vol. 6, n. 1, pp. 1–11, 2016.
- [50] F. Dogan, *Polypropylene*. 2012.
- [51] «LUZACRIL - Empresa». [Em linha]. Disponível em: <http://www.luzacril.pt>. [Acedido: 17-Jan-2017].
- [52] I. Gnip, S. Vėjelis, e S. Vaitkus, «Thermal conductivity of expanded polystyrene (EPS) at 10°C and its conversion to temperatures within interval from 0 to 50°C», *Energy Build.*, vol. 52, pp. 107–111, 2012.
- [53] V. Ferrándiz-Mas e E. García-Alcocel, «Durability of expanded polystyrene mortars», *Constr. Build. Mater.*, vol. 46, pp. 175–182, 2013.
- [54] «Plastimar - Empresa». [Em linha]. Disponível em: <http://www.plastimar.pt/>. [Acedido: 30-Jan-2017].
- [55] H. Bhadeshia e R. Honeycombe, *Steels Microstructure and Properties*, 3<sup>a</sup> Edition. 2006.
- [56] A. Campilho, *Instrumentação Eletrónica. Métodos e Técnicas de Medição*. FEUP Edições, 2013.
- [57] J. Fraden, *Handbook Of Modern Sensors, Physics, Design and Applications*. 2004.
- [58] «LP PYRA 03 - Datasheet», 2007. [Em linha]. Disponível em: <http://www.deltaohm.com>. [Acedido: 05-Jan-2017].
- [59] «Is-Energy». [Em linha]. Disponível em: <http://www.is-energy.eu/>. [Acedido: 02-Dez-2016].
- [60] «ENAT - Eletricidade e Energias Naturais». [Em linha]. Disponível em: [www.enat.pt](http://www.enat.pt). [Acedido: 14-Mar-2017].